



**HAL**  
open science

# Performances des filtres plissés à Très Haute Efficacité en fonction de l'humidité relative de l'air

Aurélie Joubert

► **To cite this version:**

Aurélie Joubert. Performances des filtres plissés à Très Haute Efficacité en fonction de l'humidité relative de l'air. Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009. Français. NNT : 2009INPL081N . tel-01748741

**HAL Id: tel-01748741**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748741>**

Submitted on 29 Mar 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

## Institut National Polytechnique de Lorraine

**Ecole Doctorale RP2E**  
Ressources Procédés Produits Environnement

### **THESE**

Présentée en vue de l'obtention du grade de  
**Docteur de l'INPL**

Spécialité  
**Génie des Procédés et des Produits**

## **Performances des filtres plissés à Très Haute Efficacité en fonction de l'humidité relative de l'air**

par  
**Aurélie JOUBERT**

Soutenue publiquement le 13 Novembre 2009, devant le jury composé de :

Président	<b>Georges GREVILLOT</b>	Directeur de recherche CNRS - LSGC
Rapporteurs	<b>Yves GONTHIER</b>	Professeur de l'Université de Savoie
	<b>Laurence LE COQ</b>	Professeur de l'Ecole des Mines de Nantes
Examineurs	<b>François JEAN</b>	Expert en ventilation AREVA NC
	<b>Jean-Claude LABORDE</b>	Chef de département SERAC de l'IRSN
	<b>Dominique THOMAS</b>	Professeur de l'Université H. Poincaré, Nancy
Membres invités	<b>Laurent BOUILLOUX</b>	Chef du Laboratoire d'Expérimentations en Confinement, Epuration et Ventilation de l'IRSN
	<b>Sandrine CALLE-CHAZELET</b>	Maître de conférences de l'Université H. Poincaré, Nancy

## AVANT-PROPOS

Je tiens à remercier tout d'abord Jean-Claude Laborde, chef du Service d'Etudes et de Recherches en Aérodispersion des polluants et en Confinement de l'IRSN, qui a encadré ces travaux de recherche. Un grand merci pour la confiance qu'il m'a accordée dès le début du projet et pour m'avoir fait partager ses connaissances scientifiques et techniques tout au long de ces trois années de thèse. Merci également pour sa grande disponibilité malgré ses fonctions, ainsi que pour la passion qu'il a manifestée et qu'il m'a su me transmettre durant nos conversations animées sur la filtration.

Mes remerciements s'adressent ensuite à Dominique Thomas et Sandrine Callé-Chazelet, de l'Université Henri Poincaré de Nancy, pour avoir accepté de diriger ces travaux de recherche. Malgré la distance, une relation de confiance s'est établie et leur appui scientifique et technique a été inestimable.

Je remercie sincèrement Laurent Bouilloux, chef du Laboratoire d'Expérimentation en Confinement, Epuration et Ventilation, pour m'avoir accueillie au sein de son laboratoire ainsi que pour son implication dans ce travail et pour ses nombreux conseils. Je remercie également François Jean, ingénieur chez AREVA NC, pour le réel intérêt et la curiosité qu'il a affichés lors des différentes réunions de présentation des résultats.

Je remercie très sincèrement Laurence Le Coq, professeur à l'Ecole des Mines de Nantes, et Yves Gonthier, professeur à l'Université de Savoie, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Merci également à Georges Grévilot, directeur de recherche au CNRS, d'avoir accepté de prendre part au jury de thèse et d'en avoir assuré la présidence.

Je tiens également à remercier Sébastien Artous pour son aide indispensable lors de la prise en main du banc d'essais CATFISH qu'il a conçu en amont de ces travaux de recherche ; la simplicité de pilotage du banc d'essais, malgré ses dimensions, a permis de travailler dans des conditions expérimentales optimales et d'enrichir ainsi davantage ces travaux de recherche.

Je remercie Romaric pour son aide expérimentale mais également pour son soutien personnel tout au long de ces trois années. Merci à Davide pour son assistance informatique et à Victor d'avoir pris le temps de me former aux calculs d'incertitude qui lui sont si chers. Je remercie François-Xavier pour s'être montré toujours très disponible et pour son aide en matière d'aérosols, ainsi que Jacques Vendel pour avoir accepté de me représenter lors d'un congrès. Je pense également à ma stagiaire Samantha qui m'a aidée à poursuivre les essais expérimentaux durant la rédaction de ce mémoire.

De façon générale, je remercie l'ensemble de mes collègues de l'IRSN pour leur accueil chaleureux. Je pense notamment à toutes les personnes du bâtiment 450, Anne-Laure avec qui j'ai partagé avec grand plaisir mon bureau, Maud, Olivier, Thibaut et Nicolas ; je les remercie très sincèrement pour l'ambiance amicale dans laquelle j'ai travaillé et qui a contribué à la bonne conduite de ces travaux. Merci également à Geneviève et Catherine (D et R) pour leur précieuse aide administrative. Je n'oublie pas Philippe, Christophe, Clothilde, Arnaud et Tony, que je remercie pour la gentillesse et l'amitié qu'ils m'ont témoignées.

Pour terminer, je remercie ma famille d'être toujours présente et à l'écoute ; je pense en particulier à ma maman, Françoise, qui a pris le temps de relire l'ensemble de ce mémoire. Et enfin, merci à toi Adrien pour ton soutien sans faille.

## TABLE DES MATIERES

<b>NOMENCLATURE.....</b>	<b>i</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>3</b>
I. TECHNOLOGIE ET PERFORMANCES D'UN MEDIUM FILTRANT THE .....	3
I.1. Technologie des filtres THE.....	3
I.2. Perte de charge d'un medium filtrant vierge .....	6
I.3. Efficacité de filtration d'un medium vierge.....	9
I.4. Adhésion et réentraînement des particules .....	15
II. FILTRATION D'AEROSOLS SOLIDES.....	18
II.1. Evolution des performances d'un filtre.....	18
II.2. Influence de divers paramètres.....	20
II.3. Modélisation .....	24
III. FILTRATION D'AEROSOLS LIQUIDES .....	27
III.1. Comportement d'un aérosol liquide filtré .....	28
III.2. Evolution des performances d'un filtre .....	29
III.3. Influence de divers paramètres .....	30
III.4. Modélisation.....	32
IV. ETUDE DE L' AIR HUMIDE ET DE SES INTERACTIONS .....	34
IV.1. Paramètres hygrométriques.....	34
IV.2. Interactions entre l'air humide et le medium filtrant.....	35
IV.3. Interactions entre l'air humide et l'aérosol.....	36
IV.4. Evolution d'une gouttelette.....	44
V. FILTRATION THE SOUS HUMIDITE .....	45
V.1. Influence de l'humidité sur le medium vierge .....	46
V.2. Influence de l'humidité sur le colmatage de filtres plans .....	46
V.3. Influence de l'humidité en filtration industrielle.....	50
VI. CONCLUSION .....	54
<b>CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODE.....</b>	<b>55</b>
I. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAIS.....	55
I.1. Schématisation du banc d'essais.....	55
I.2. Production de l'effluent .....	56
I.3. Mesures des paramètres caractéristiques de l'effluent.....	57
I.4. Qualification de l'instrumentation aéraulique.....	58
I.5. Acquisition des données.....	59
II. AEROSOLS UTILISES ET METROLOGIE ASSOCIEE .....	60
II.1. Description des aérosols.....	60
II.2. Moyens de production et de caractérisation des aérosols .....	61
II.3. Caractérisation des aérosols produits.....	66
III. FILTRES TESTES.....	76
III.1. Technologie des filtres testés.....	76
III.2. Propriétés physiques du medium filtrant vierge.....	77
III.3. Performances des filtres vierges .....	78
IV. METHODOLOGIE .....	83
IV.1. Protocole expérimental.....	83
IV.2. Gamme d'étude.....	84
IV.3. Détermination des grandeurs caractéristiques durant le colmatage.....	84
V. CONCLUSION.....	86
<b>CHAPITRE 3 : RESULTATS EXPERIMENTAUX PROPRES A L'INFLUENCE DE L'HUMIDITE DANS LE DOMAINE DE LA FILTRATION THE .....</b>	<b>87</b>
I. PERFORMANCES INITIALES DES FILTRES PLSSES SOUS HUMIDITE.....	87
I.1. Perte de charge initiale des filtres et masse d'eau adsorbée .....	87
I.2. Efficacité initiale des filtres .....	88

II. COLMATAGES DE FILTRES SOUS HUMIDITE.....	90
II.1. Expériences élémentaires de colmatage sur filtres plans .....	90
II.2. Colmatages de filtres plissés sous humidité.....	94
II.3. Influence de la vitesse de filtration .....	97
II.4. Comparaison entre les colmatages sur filtres plans et plissés.....	100
II.5. Evolution des paramètres hygrométriques et des masses d'eau adsorbées.....	102
III. CARACTERISATION DU DEPOT DES PARTICULES SOUS HUMIDITE.....	106
III.1. Géométrie du dépôt des particules pour les filtres plans .....	106
III.2. Evaluation de l'épaisseur des gâteaux de particules.....	109
III.3. Résistances spécifiques des gâteaux de particules des filtres plans .....	111
III.4. Dépôt des particules au niveau des plis .....	112
IV. EVOLUTION DU COEFFICIENT D'EPURATION DES FILTRES PLISSES COLMATES SOUS HUMIDITE .....	117
IV.1. Colmatages avec l'aérosol d'alumine .....	117
IV.2. Colmatages avec l'aérosol de chlorure de sodium.....	118
IV.3. Comparaison des aérosols.....	120
V. INFLUENCE DE LA PRESENCE D'HUMIDITE SUR LA PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE APRES SON COLMATAGE .....	121
V.1. Maintien du taux d'humidité relative de l'air après le colmatage.....	121
V.2. Changement d'humidité relative après le colmatage.....	123
VI. CONCLUSION .....	126
<b>CHAPITRE 4 : MODELISATION DE L'EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE DURANT SON COLMATAGE SOUS HUMIDITE.....</b>	<b>128</b>
I. MODELISATION DE LA PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE DURANT LA FORMATION D'UN GATEAU DE PARTICULES .....	128
I.1. Expériences complémentaires.....	128
I.2. Enoncé de la méthode globale de modélisation .....	131
I.3. Présentation des résultats .....	132
II. MODELISATION DE L'EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE PLISSE .....	137
II.1. Modélisation de la perte de charge en air sec.....	138
II.2. Modélisation de la perte de charge en air humide .....	139
II.3. Modélisation de la réduction de la surface de filtration.....	141
III. CONCLUSION.....	145
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>147</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>150</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>155</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>156</b>
<b>LISTE DES PUBLICATIONS ET DES COMMUNICATIONS.....</b>	<b>160</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>161</b>

## **NOMENCLATURE**

### Lettres latines

A	Constante de Hamaker	J*
$A_f$	Surface volumique des fibres	$m^{-1}$
a	Surface de la particule	$m^2$
B	Perméabilité du medium filtrant	$m^2$
$C_{amont}$	Concentration en particules en amont du filtre	$kg.m^{-3}$
$C_{aval}$	Concentration en particules en aval du filtre	$kg.m^{-3}$
CE	Coefficient d'Épuration du filtre	-
$CE_j$	Coefficient d'Épuration du filtre pour le mécanisme j	-
$C_m$	Concentration massique en particules	$kg.m^{-3}$
$C_n$	Concentration numérique en particules	$part.m^{-3}$
$C_v$	Concentration volumique d'une solution	-
Cu	Coefficient de Cunningham	-
D	Coefficient de diffusion	$m^2.s^{-1}$
$d_a$	Diamètre aéraulique des fibres	m
$d_{ae}$	Diamètre aérodynamique	m
$d_B$	Diamètre de mobilité électrique	m
$d_{ev}$	Diamètre en équivalent volume	m
$d_f$	Diamètre des fibres	m
$d_g$	Diamètre de la goutte	m
$d_h$	Diamètre de la particule humide	m
$d_p$	Diamètre de la particule	m
E	Energie libre d'une particule	J
$e_g$	Épaisseur du gâteau de particules	m
$F_{adh}$	Force d'adhésion	$N^\dagger$
$F_{cap}$	Force de capillarité	N
$F_d$	Force de traînée	N
$F_{vdw}$	Force de Van der Waals	N
G	Grammage du medium	$kg.m^{-2}$
$G_{goutte}$	Enthalpie libre d'une goutte	J
$G_{vapeur}$	Enthalpie libre de la vapeur	J
$g_c$	Facteur de croissance	-
$H_{Ku}$	Facteur hydrodynamique selon Kuwabara (1959)	-
HR	Humidité Relative de l'air	%
HRD	Humidité Relative de Déliquescence	%

---

\* 1 J = 1 N.m = 1 kg.m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup>

† 1 N = 1 kg.m.s<sup>-2</sup>

HRE	Humidité Relative d'Efflorescence	%
h	Hauteur du pli	m
$h_k$	Constante de Kozeny	-
$K_1$	Résistance du medium filtrant	$m^{-1}$
$K_2$	Résistance spécifique du gâteau de particules	$s^{-1}$
$k_B$	Constante de Boltzmann	$J.K^{-1}$
L	Longueur du pli	m
$M_1$	Masse molaire du liquide	$kg.mol^{-1}$
$m_{as}$	Masse d'air sec	kg
$m_l$	Masse de liquide collecté	kg
$m_s$	Masse de particules collectées	kg
$m_v$	Masse de vapeur d'eau	kg
N	Nombre de couches formant le gâteau de particules	-
$N_p$	Nombre de plis	-
n	Nombre de moles	mol
P	Perméance du filtre	-
$P_{amont}$	Pression statique à l'amont du medium filtrant	$Pa^*$
$P_{aval}$	Pression statique à l'aval du medium filtrant	Pa
$P_i$	Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air	Pa
$P_g$	Pression de vapeur saturante au niveau de la goutte	Pa
$P_s$	Pression de vapeur saturante au-dessus d'une surface plane	Pa
p	Pas du pli	m
$Q_v$	Débit volumique de l'air	$m^3.s^{-1}$
q	Débit massique en particules	$kg.s^{-1}$
R	Résistance du medium	$kg.m^{-3}.s^{-1}$
$R_0$	Rendement du filtre	%
$R_{GP}$	Constante des gaz parfaits	$J.mol^{-1}.K^{-1}$
$R_m$	Résistance mécanique du filtre	Pa
r	Rapport de mélange de l'air	-
$r^*$	Rayon de Kelvin	m
$r_f$	Rayon des fibres	m
$r_g$	Rayon de la goutte	m
S	Taux de saturation	-
$S^*$	Taux de saturation critique	-
$S_f$	Surface de filtration	$m^2$
$S_{f_0}$	Surface de filtration du filtre vierge	$m^2$
T	Température	K
t	Temps	s

---

\*  $1 Pa = 1 kg.m^{-1}.s^{-2}$

$t_f$	Durée de filtration totale	s
$U_f$	Vitesse de filtration	$m.s^{-1}$
$U_0$	Vitesse de filtration en début de colmatage (filtre vierge)	$m.s^{-1}$
$U_i$	Vitesse interstitielle	$m.s^{-1}$
$\frac{U_p}{u_w}$	Vitesse de l'aérosol par rapport au fluide	$m.s^{-1}$
$u_w$	Volume molaire de l'eau pure	$cm^3.mol^{-1}$
$V_f$	Vitesse de filtration en fût vide	$m.s^{-1}$
$W_T$	Masse surfacique de particules collectées au point de transition	$kg.m^{-2}$
$Z$	Epaisseur du medium	m
$z$	Distance de séparation entre deux surfaces en interaction	m

### Lettres grecques

$\alpha$	Compacité du medium	-
$\alpha_g$	Compacité du gâteau de particules	-
$\chi$	Facteur de forme dynamique de la particule	-
$\Delta G$	Variation d'enthalpie libre	J
$\Delta H_s$	Variation d'enthalpie de la solution	J
$\Delta P$	Perte de charge du filtre	Pa
$\Delta P_0$	Perte de charge initiale du filtre	Pa
$\Delta P_G$	Perte de charge du gâteau de particules	Pa
$\Delta P_j$	Perte de charge de la couche j du gâteau de particules	Pa
$\Delta P_M$	Perte de charge du medium filtrant plan	Pa
$\Delta P_S$	Perte de charge liée aux singularités du filtre plissé	Pa
$\Delta e_g$	Epaisseur de chaque couche formant le gâteau de particules	m
$\Delta m_s$	Masse de particules dans chaque couche formant le gâteau	kg
$\Delta t$	Temps de formation de chaque couche formant le gâteau de particules	s
$\varepsilon$	Porosité du medium ( $\varepsilon = 1-\alpha$ )	-
$\varepsilon_g$	Porosité du gâteau de particules ( $\varepsilon_g = 1-\alpha_g$ )	-
$\gamma_l$	Tension superficielle du liquide	$N.m^{-1}$
$\gamma_{ls}$	Tension interfaciale liquide-solide	$N.m^{-1}$
$\gamma_s$	Tension superficielle du solide	$N.m^{-1}$
$\eta_d$	Efficacité unitaire de collecte d'une fibre pour le mécanisme de diffusion	-
$\eta_i$	Efficacité unitaire de collecte d'une fibre pour le mécanisme d'impaction inertielle	-
$\eta_j$	Efficacité unitaire de collecte d'une fibre pour le mécanisme j	-
$\eta_t$	Efficacité unitaire de collecte d'une fibre pour le mécanisme d'interception	-
$\lambda$	Libre parcours moyen des molécules de gaz	m
$\mu$	Viscosité dynamique du gaz	Pa.s

$\mu_l$	Viscosité dynamique du liquide	Pa.s
$\theta$	Angle de contact goutte-fibre	rad
$\rho$	Masse volumique du gaz	$\text{kg.m}^{-3}$
$\rho_0$	Masse volumique de la vapeur d'eau condensée	$\text{kg.m}^{-3}$
$\rho_f$	Masse volumique des fibres	$\text{kg.m}^{-3}$
$\rho_h$	Masse volumique de la particule sèche	$\text{kg.m}^{-3}$
$\rho_l$	Masse volumique du liquide	$\text{kg.m}^{-3}$
$\rho_p$	Masse volumique de la particule	$\text{kg.m}^{-3}$
$\sigma_g$	Ecart-type géométrique de la distribution granulométrique	-
$\Omega$	Section en amont ou en aval du filtre	$\text{m}^2$
$\psi$	Potentiel chimique	$\text{J.mol}^{-1}$
$\zeta$	Coefficient de perte de charge	-

#### Nombres adimensionnels

I	Nombre d'interception
$\text{Kn}_p$	Nombre de Knudsen de particules
$\text{Kn}_f$	Nombre de Knudsen de fibres
Pe	Nombre de Peclet
$\text{Re}_f$	Nombre de Reynolds (filtres plissés)
$\text{Re}_l$	Nombre de Reynolds local
$\text{Re}_p$	Nombre de Reynolds de particules
$\text{Re}_{po}$	Nombre de Reynolds de pores
St	Nombre de Stokes

#### Notation adoptée pour l'expression des diamètres statistiques

- indices :
  - n : distribution en nombre,
  - m : distribution en masse,
  - g : géométrique.
- attributs :
  - : moyen,
  - ~ : médian.

## INTRODUCTION

L'épuration de l'air est une préoccupation majeure dans de nombreux secteurs industriels : bâtiment (Bonnevie-Perrier, 2008), automobile, nucléaire (Del Fabbro, 2001). Elle concerne des polluants présents sous la forme de gaz ou de particules en suspension dans l'air. Les techniques d'épuration sont le plus souvent différentes selon la nature des polluants, même si certaines études s'intéressent à des traitements combinés (Lorimier, 2005).

Dans l'industrie nucléaire, les aérosols sont les principaux vecteurs de contamination et leur piégeage est assuré par des filtres plissés à Très Haute Efficacité (THE) ; ces derniers sont donc utilisés pour le maintien du confinement des substances radioactives dans les installations nucléaires. Ainsi, ils constituent, en situation nominale de fonctionnement comme en cas de développement d'une situation accidentelle, la barrière ultime avant un rejet dans le milieu extérieur. Ces filtres sont donc un des éléments sensibles de la sûreté nucléaire.

Certains scénarios accidentels peuvent conduire à une forte augmentation de l'humidité de l'effluent gazeux. L'apparition d'une brèche sur une tuyauterie avec relâchement de vapeur, ou encore l'utilisation de spray d'eau pour l'extinction d'un incendie, accompagnées de l'émission d'aérosols, en sont deux exemples. Par ailleurs, même en situation nominale de fonctionnement d'une installation, les variations de l'humidité relative ambiante, lorsqu'elle n'est pas contrôlée, peuvent entraîner des incertitudes quant au comportement réel des filtres ou à leur caractérisation, par exemple lors des tests sur site de l'efficacité à l'aide de méthodes normalisées. Il apparaît alors indispensable de pouvoir prédire, en cas de forte humidité, le comportement des filtres en termes d'évolution de leur perte de charge ou de leur efficacité qui pourrait nuire au maintien du confinement mis en œuvre dans les installations nucléaires.

Il existe peu d'études analytiques sur l'influence de l'humidité en filtration THE. Des travaux, effectués sur des filtres de géométrie plane (Gupta *et al.*, 1993), ont mis en évidence une influence de l'humidité relative sur l'évolution de la perte de charge du filtre durant son colmatage. Ces travaux ont également souligné l'importance de la nature hygroscopique de l'aérosol qui est d'ailleurs au cœur de réelles préoccupations dans le domaine nucléaire. En effet, selon Jokiniemi (1990), dans certaines situations, des produits de fission de forme très hygroscopique peuvent être libérés. Le césium est l'espèce libérée en plus grande quantité ; celui-ci est rapidement transformé en oxyde de césium qui est un aérosol extrêmement hygroscopique, puisqu'à 25°C sa déliquescence s'amorce à 2 % d'humidité relative.

Ainsi, les résultats obtenus sur des filtres THE de géométrie plane constituent une base de données intéressante, mais l'étude sur des filtres plissés demeure indispensable puisque ces derniers présentent durant leur colmatage, une phase de réduction de leur surface de filtration qui modifie considérablement l'évolution de leur perte de charge et de leur efficacité.

L'objet de ce travail est donc de pallier un manque de connaissances sur le comportement de filtres THE plissés, en termes de colmatage par des aérosols en présence d'humidité.

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre d'une collaboration entre le Service d'Etudes et de Recherches en Aérodispersion des polluants et en Confinement (SERAC) de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), AREVA NC et le Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (LSGC) de Nancy. Afin de combler le manque de données analytiques sur le colmatage des filtres THE plissés en présence d'humidité, l'IRSN s'est doté d'un banc d'essais qui offre une parfaite maîtrise de l'humidité de l'effluent à traiter.

Les objectifs des travaux sont, d'une part d'améliorer les connaissances sur l'influence de la présence d'humidité au niveau de l'évolution de la perte de charge et de l'efficacité d'un filtre THE plissé, d'autre part d'accéder à un modèle prédictif de l'évolution de la perte de charge d'un filtre THE en présence d'humidité.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique de la filtration à Très Haute Efficacité d'aérosols solide et liquide, en air sec et en présence d'humidité.

Le deuxième chapitre présente le matériel et la méthodologie employés durant les travaux. Les filtres plissés testés ont la même géométrie de plissage, dite à petits plis, et les mêmes caractéristiques du medium que ceux généralement rencontrés dans l'industrie nucléaire française ; des filtres plans, constitués du même medium filtrant, sont également testés. De plus, deux types d'aérosol de nature hygroscopique différente sont employés pour colmater ces filtres : un aérosol micronique non-hygroscopique d'alumine et un aérosol submicronique hygroscopique de chlorure de sodium ; par ailleurs, l'aérosol normalisé de fluorescéine sodée a été utilisé afin de caractériser l'évolution de l'efficacité d'un filtre. L'évolution de la granulométrie de ces différents aérosols sous humidité est tout particulièrement étudiée dans ce chapitre.

Le troisième chapitre expose les résultats expérimentaux, propres à l'influence de l'humidité, obtenus avec les filtres THE plans et plissés ; l'influence couplée de la vitesse de filtration avec les paramètres géométriques et la nature des aérosols est tout particulièrement mise en évidence. En outre, les colmatages des filtres plans ont permis une caractérisation des gâteaux de particules formés à leur surface.

Le quatrième et dernier chapitre traite de l'aspect modélisation des résultats. Une méthode globale de modélisation de la perte de charge d'un filtre THE durant la formation d'un gâteau de particules en présence d'humidité, sans réduction de la surface de filtration, est tout d'abord proposée, sur la base d'expériences complémentaires réalisées afin de connaître la vitesse d'adsorption de la vapeur d'eau par le gâteau de particules formé. Après avoir montré les limites d'utilisation des rares modèles existants pour décrire l'évolution de la perte de charge de filtres plissés en air sec, sont ensuite abordées quelques pistes de modélisation pour des conditions d'air humide.

## CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### I. TECHNOLOGIE ET PERFORMANCES D'UN MEDIUM FILTRANT THE

Un medium filtrant permet de séparer des particules solides ou liquides en suspension dans un courant gazeux, dans le but de produire un gaz de haute pureté ou afin de récupérer les particules. Les performances d'un medium filtrant s'évaluent principalement à partir de deux grandeurs : sa perte de charge et son efficacité. Ces performances diffèrent selon la nature du medium. Dans le cas d'un filtre Très Haute Efficacité (THE), le medium filtrant qui est constitué généralement de fibres de verre permet d'arrêter un très grand nombre de particules. Ces filtres sont utilisés dans les salles blanches, les hôpitaux ou encore dans l'industrie nucléaire.

Durant le processus de filtration, deux phases successives se distinguent :

- la première, pendant laquelle l'apport de matière est insuffisant pour modifier la structure du medium filtrant. L'efficacité et la perte de charge évoluent peu au cours du temps ;
- la seconde, ou colmatage du filtre, qui prend en compte les modifications au cours du temps des propriétés du medium filtrant, au fur et à mesure que le dépôt de matière s'accroît. Les grandeurs efficacité et perte de charge ne peuvent plus alors être considérées comme peu dépendantes du temps.

Dans la première partie de ce chapitre qui est consacré à l'étude bibliographique de la filtration THE, les filtres sont tout d'abord abordés d'un point de vue technologique. Les performances d'un medium filtrant vierge sont ensuite examinées en termes de perte de charge et d'efficacité, ainsi que les différents mécanismes à l'origine de la capture des particules par le medium. Enfin, une synthèse des modèles d'efficacité et de perte de charge d'un filtre THE vierge disponibles dans la littérature est proposée.

#### I.1. Technologie des filtres THE

##### I.1.1. Conception des filtres THE

Une cellule filtrante (*Cf.* figure 1-1) se compose d'un cadre ou d'une armature parallélépipédique ou cylindrique qui est en acier galvanisé ou inoxydable (cas des filtres standards placés dans les réseaux de ventilation à l'intérieur de caissons de filtration) et parfois en polymères, dans le cas des cartouches filtrantes d'enceintes types boîtes à gants ou des filtres incinérables. Le lut est un produit placé à l'intérieur du cadre afin d'assurer l'étanchéité entre le medium filtrant et l'armature ; ce lut est en matière minérale ou en matière plastique (chlorure de polyvinyle, polyuréthane, silicone). Les joints d'étanchéité placés en amont ou en aval autour de l'armature sont en néoprène, fibres de verre ou silicone. Le medium filtrant utilisé est à base de fibres de verre et des liants organiques sont ajoutés en faible concentration (< 5 %) pour assurer la rigidité à l'ensemble.

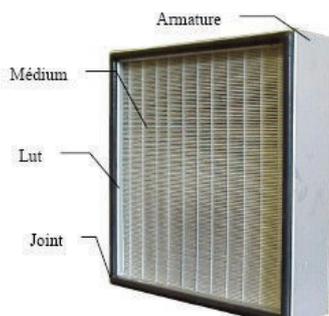


Figure 1-1 : Eléments composant un filtre THE

Etant données la résistance à l'écoulement relativement élevée des media filtrants utilisés et leur vitesse d'exploitation, les fabricants sont amenés à utiliser des surfaces de media très importantes qu'il est indispensable de plisser. Les dimensions des filtres industriels des réseaux de ventilation sont en grande partie standardisées au format américain, ou dérivées de ce dernier en demi-cellule ou dièdre (Cf. figure 1-2).



Figure 1-2 : Exemple d'une demi-cellule (composée de deux dièdres) utilisée dans les installations nucléaires françaises

Il existe deux techniques de plissage :

- la conception américaine, fondée sur le plissage à plis profonds, en accordéon suivant toute la profondeur du filtre ; les plis sont maintenus écartés par des intercalaires gaufrés réalisés en carton ou en aluminium ; cette technique permet d'obtenir un débit de filtration nominal d'une cellule complète (composée de  $18 \text{ m}^2$  de medium filtrant) d'environ  $1700 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  avec une perte de charge nominale de  $250 \text{ Pa}$  ;
- la conception française, fondée sur le plissage à petits plis, où les plis ont une hauteur comprise entre  $20$  et  $50 \text{ mm}$  et sont entrecroisés au moyen de fils ou de bandelettes ininflammables ; un dièdre est généralement constitué de plis de  $30 \text{ mm}$  de haut disposés en v dans un cadre métallique. Cette conception offre la possibilité de traiter un débit d'air plus important qu'avec la conception américaine pour un même encombrement. Ce type de plissage permet ainsi d'obtenir un débit de filtration nominal, pour une cellule complète (composée de  $36 \text{ m}^2$  de medium filtrant), de  $3400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  avec une perte de charge nominale de  $250 \text{ Pa}$ .

Deux grandeurs sont utilisées pour caractériser le plissage d'un filtre plissé de conception française : le pas noté  $p$  (distance entre les sommets de deux plis), et la hauteur du pli notée  $h$  (Cf. figure 1-3).

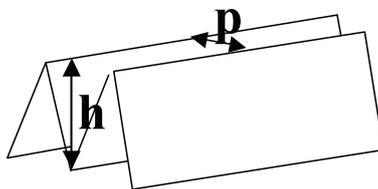


Figure 1-3 : Schématisation de la hauteur et du pas d'un pli (Del Fabbro, 2001)

### I.1.2. Classification des filtres THE

Il existe dans le monde plusieurs normes pour l'évaluation de l'efficacité d'un filtre THE. Dans le secteur nucléaire français, les filtres utilisés sont classés selon leur efficacité par une norme européenne, mais les conditions de réalisation des mesures sur site sont fixées par une norme française. Ces deux normes, présentées dans le tableau 1-1, utilisent deux types d'aérosols différents. Une valeur d'efficacité n'a donc de sens que si la méthode de mesure employée est précisée.

Tableau 1-1: Normes utilisées dans le secteur nucléaire français pour la mesure de l'efficacité de filtres THE

Norme	Aérosol utilisé	Diamètre aérodynamique médian massique de l'aérosol ( $\mu\text{m}$ )
européenne NF EN 1822	Aérosol liquide à faible pression de vapeur et à température ambiante (DEHS, DOP ou huile de paraffine)	0,15 – 0,3
française NF X 44-011	Aérosol solide d'uranine	0,18

Avec le DEHS : DiEthylHexyl Sebacate et le DOP : DiOctyle Phtalate ; le diamètre aérodynamique est le diamètre d'une sphère ayant la même vitesse de chute que l'aérosol considéré, et une masse volumique de  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$  ; le diamètre médian massique est le diamètre pour lequel 50 % de la masse totale des particules constituant l'aérosol polydispersé est de taille supérieure et 50 % de taille inférieure.

Ces normes s'appuient sur la mesure de l'efficacité de capture de la classe de particules la plus difficile à arrêter, appelée MPPS (Most Penetrating Particule Size), se situant autour de  $0,15 \mu\text{m}$ .

La norme NF X 44-011 est complétée par une homologation délivrée par le Centre Technique d'Homologation des Equipements Nucléaires (CTHEN) de l'IRSN, applicable aux filtres THE équipant le dernier niveau de filtration des installations nucléaires, en réponse aux exigences de performances indiquées dans le cahier des charges fonctionnel CTHEN (rapport IPSN/DPEI/STESR 93-030).

La norme NF EN 1822 impose aux filtres d'assurer deux caractéristiques d'efficacité. La première est l'efficacité globale, utilisée pour désigner les filtres. La seconde, l'efficacité locale, oblige les fabricants à scanner le filtre afin de vérifier qu'en chaque point du filtre, un niveau minimal d'efficacité est garanti. La norme définit différentes classes de filtres en fonction des efficacités globale et locale des filtres neufs (Cf. tableau 1-2).

Tableau 1-2 : Classification NF EN 1822 des filtres HEPA (Bouilloux, 2006)

Classe de filtre	Valeurs intégrales MPPS			Valeurs locales MPPS		
	$R_0$ minimal (%)	P minimale (%)	CE minimal	$R_0$ minimal (%)	P minimale (%)	CE minimal
H10	85	15	6,7			
H11	95	5	20			
H12	99,5	0,5	200	97,5	2,5	40
H13	99,95	0,05	2 000	99,75	0,25	400
H14	99,995	0,005	20 000	99,975	0,025	4 000

Avec  $R_0$  le rendement, P la perméance et CE le coefficient d'épuration du filtre, trois grandeurs explicitées dans le paragraphe I.3.1.

### I.1.3. Propriétés physiques caractéristiques

Un filtre THE, comme tout medium filtrant, est caractérisé par un certain nombre de grandeurs physiques :

- le grammage G qui exprime le rapport entre la masse du medium et sa surface,
- l'épaisseur Z,
- la compacité  $\alpha$  qui exprime le rapport du volume des fibres sur le volume total du filtre. La notion de porosité peut également être employée :  $\varepsilon = 1 - \alpha$ ,
- le diamètre des fibres  $d_f$ .

Pour un filtre THE, le grammage se situe entre  $70$  et  $100 \text{ g.m}^{-2}$ , l'épaisseur moyenne est d'environ  $0,4 \text{ mm}$ , la porosité est supérieure à  $90 \%$  et le diamètre moyen des fibres est de l'ordre du micromètre.

## I.2. Perte de charge d'un medium filtrant vierge

La perte de charge  $\Delta P$  se définit, dans le cas d'une conduite horizontale sans changement de section, comme la différence entre les pressions statiques en amont et en aval du medium filtrant :

$$\Delta P = P_{\text{amont}} - P_{\text{aval}} \quad (1-1)$$

### I.2.1. Lois d'écoulement des gaz propres à travers les filtres

Le régime d'écoulement de l'air à travers le filtre vierge, considéré comme un milieu poreux, est caractérisé par le nombre de Reynolds de pores  $Re_{po}$  défini par :

$$Re_{po} = \frac{\rho \cdot U_f}{\mu \cdot A_f \cdot \alpha} \quad (1-2)$$

avec  $\rho$  la masse volumique du fluide,  $U_f$  la vitesse de filtration,  $\mu$  la viscosité dynamique du fluide et  $A_f$  la surface volumique des fibres.

#### a. Modèle de Darcy

En écoulement laminaire, i. e. pour  $Re_{po} < 1$ , la perte de charge du filtre vierge peut être donnée par la loi de Darcy pour un fluide incompressible :

$$\Delta P_0 = \frac{Z}{B} \cdot \mu \cdot U_f \quad (1-3)$$

avec  $B$  la perméabilité du milieu fibreux, définie par la relation :

$$B = \frac{r_f^2}{f(\alpha)} \quad (1-4)$$

avec  $r_f$  le rayon des fibres constituant le medium filtrant et  $f(\alpha)$  une fonction dépendant de la compacité du medium. Ainsi, la perméabilité  $B$  peut être évaluée à partir de la mesure expérimentale de la résistance  $K_1$  du medium filtrant à l'écoulement qui s'exprime par la relation :

$$B = \frac{Z}{K_1} \quad (1-5)$$

L'expression (1-3) peut ainsi également s'écrire sous la forme :

$$\Delta P_0 = \mu \cdot K_1 \cdot U_f \quad (1-6)$$

La limite de validité de la loi de Darcy peut également être déterminée à partir de la valeur du nombre de Reynolds local  $Re_1$  lié à l'écoulement défini par :

$$Re_1 = \frac{\rho \cdot U_f \cdot \sqrt{B}}{\mu} \quad (1-7)$$

Comme pour le Reynolds de pores, l'écoulement est laminaire si  $Re_1 < 1$ .

#### b. Modèle non darcyen

Pour des écoulements suivant la loi de Darcy (à faible vitesse de filtration), il est établi que le gradient de pression est une fonction linéaire de la vitesse de filtration. Mais pour des vitesses plus élevées, des écarts à la loi de Darcy sont observés. Ils sont dus à des effets d'inertie (les lignes de courant à l'intérieur du milieu poreux sont non seulement très sinueuses, mais en plus convergent et divergent rapidement).

Ainsi, pour caractériser des écoulements non darcyens dans des milieux poreux, Reynolds en 1900 et Muskat en 1937, ont suggéré que le gradient de pression axial puisse être représenté par la forme suivante :

$$-\frac{dp}{dx} = a.\mu.U_f + b.\rho.U_f^2 \quad (1-8)$$

$a$  est une constante pour un medium donné et  $b$  dépend de plusieurs facteurs, dont la géométrie du milieu poreux et la vitesse de filtration. Le premier terme en  $U_f$  correspond aux pertes par frottements visqueux et le second terme en  $U_f^2$  aux pertes dues à l'inertie.

Miguel (1998) cite la relation de Dupuit-Forchheimer :

$$\Delta P_0 = \frac{\mu.Z}{B}.U_f + \frac{\rho.Z.Y}{B^{0,5}}.U_f^2 \quad (1-9)$$

avec  $Y$  un facteur inertiel qui dépend de la porosité du medium. La limite d'utilisation de cette relation est fixée pour  $Re_1 > 1$ .

### c. Cas des filtres plissés

Dans le cas des filtres plissés, il faut noter que des pertes de charge supplémentaires viennent s'ajouter aux termes de frottement visqueux, à cause de leur géométrie particulière ; ces pertes de charge sont dues à la contraction de l'écoulement à l'entrée du filtre et à son expansion en sortie (ainsi qu'aux frottements éventuels le long de la hauteur du pli).

Del Fabbro (2001) a étudié la répartition de l'écoulement de l'air le long de la hauteur d'un pli pour un filtre de type nucléaire ( $h = 27,5$  mm et  $p = 2,2$  mm) ; elle définit trois zones : le creux du pli, le milieu et la crête. Del Fabbro (2001) observe qu'à faible vitesse de filtration ( $1 \text{ cm.s}^{-1}$ ), la répartition de l'écoulement de l'air dans un pli peut être considérée comme homogène ; lorsque la vitesse de filtration augmente ( $10 \text{ cm.s}^{-1}$ ), cela favorise l'écoulement de l'air dans le creux du pli. En testant différents filtres THE de hauteur et de pas différents, les résultats ont montré que la répartition de l'écoulement devient moins homogène lorsque le rapport  $\frac{h}{p^2}$  augmente.

## I.2.2. Modélisation

Il existe différents modèles de perte de charge applicables à un filtre THE. L'essentiel des modèles concerne le medium filtrant et est donc applicable aux filtres de géométrie plane ; pour les filtres plissés, les modèles applicables au medium filtrant peuvent également être employés, mais des pertes de charge supplémentaires dues à la géométrie des filtres doivent être ajoutées.

### a. Filtre plan

De nombreuses expressions existent dans la littérature permettant d'estimer la perte de charge d'un filtre plan vierge et en particulier la fonction  $f(\alpha)$  issue de la relation (1-4). Celles-ci ne sont pas applicables qu'aux filtres THE mais plus généralement à tous les media fibreux.

Thomas (2001) a classé les différents modèles existants en trois catégories, selon le type d'écoulement de l'air à travers le medium :

- les modèles théoriques fondés sur un écoulement parallèle aux fibres,
- les modèles théoriques fondés sur un écoulement perpendiculaire aux fibres,
- les modèles empiriques fondés sur un écoulement à travers un arrangement aléatoire des fibres.

Thomas (2001) a comparé ces modèles à des données expérimentales et montre qu'aucun des modèles de perte de charge recensés ne permet de prédire l'ensemble des valeurs expérimentales. Il impute cela notamment à la polydispersion des fibres qui ne peut être convenablement caractérisée uniquement par un diamètre moyen, comme c'est le cas dans ces modèles.

Sadako (2000), cité par Thomas (2001), propose un modèle dans lequel il tient compte de cette polydispersion, en considérant la perte de charge comme la somme des pertes de charge liées à chaque fibre.

Le modèle empirique de Davies (1973), qui est encore aujourd'hui le plus usité, peut être cité :

$$\Delta P_0 = 64\alpha^2 \left(1 + 56\alpha^3\right) \mu \cdot U_f \cdot \frac{Z}{d_f^2} \quad (1-10)$$

avec  $d_f$  le diamètre des fibres qui constituent le medium ; le terme  $56\alpha^3$  est souvent négligé pour de faibles valeurs de la compacité ( $\alpha < 0,3$ ).

#### b. Filtre plissé

Deux modèles de perte de charge applicables aux filtres à petits plis vierges peuvent être recensés. Tout d'abord celui de Del Fabbro (2001), qui est un modèle semi-empirique, fondé sur une approche adimensionnelle. Ce modèle intègre des paramètres aérauliques mais aussi des caractéristiques géométriques du filtre plissé. Le second modèle, proposé par Thomas (Callé-Chazelet *et al.*, 2008 a), est fondé sur une approche semi-empirique de l'écoulement.

#### Modèle adimensionnel de Del Fabbro

Dans le modèle de Del Fabbro (2001), la perte de charge du filtre résulte de la contribution de deux termes :

- la perte de charge due à la traversée du medium filtrant. Ce terme est à rapprocher de la loi de Darcy ;
- les pertes de charge dues aux frottements le long des plis, à la contraction puis à l'expansion de l'écoulement. Elles sont fonction des caractéristiques géométriques  $h$  et  $p$  du filtre plissé et du nombre de Reynolds  $Re_f$  définissant l'écoulement à travers un filtre plissé :

$$Re_f = \frac{\rho \cdot U_f \cdot p}{\mu} \quad (1-11)$$

Ces considérations ainsi que la mise en œuvre d'une approche adimensionnelle, fondée sur le théorème de Vaschy-Buckingham, ont permis à Del Fabbro (2001) d'aboutir au modèle suivant :

$$\log\left(\frac{\Delta P_0}{Z \cdot R \cdot U_f}\right) = \left(\frac{\mu}{Z^2 \cdot R}\right)^{0,7} \cdot \left(460 \cdot \log\left(1 + \frac{h \cdot Z}{p^2}\right) + \frac{0,7 \cdot \left(\frac{h}{p}\right)^2}{\log\left(1 + \frac{h}{Z} \cdot \frac{1}{Re_f}\right)}\right) \quad (1-12)$$

avec  $R$  définissant comme  $K_1$  la résistance du medium filtrant (de géométrie plane) à l'écoulement :

$$\Delta P_0 = R \cdot \frac{Z}{1 - \alpha} \cdot U_f \quad (1-13)$$

Lorsque la hauteur des plis  $h$  est très faible ou que le pas  $p$  entre les plis est très grand, le modèle permet de retrouver la loi linéaire de Darcy propre aux filtres plans. Ce modèle a été élaboré de façon à modéliser la perte de charge des filtres THE de l'industrie nucléaire, comme celle des filtres ME (Moyenne Efficacité) de l'industrie automobile.

#### Modèle semi-théorique de Thomas (Callé-Chazelet *et al.*, 2008 a)

Comme Del Fabbro (2001), Thomas (Callé-Chazelet *et al.*, 2008 a) définit la perte de charge du filtre plissé vierge comme la somme de la perte de charge du medium filtrant plan  $\Delta P_M$  et de la perte de charge liée aux singularités  $\Delta P_S$  due aux rétrécissements (entrée d'air dans le pli) et aux élargissements (sortie d'air dans le pli).

La perte de charge du medium plan pour un écoulement laminaire est donnée par la relation de Darcy ; la perte de charge liée aux singularités est proportionnelle à l'énergie cinétique du fluide :

$$\Delta P_s = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V_f^2 = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left( \frac{S_f}{\Omega} \right)^2 \cdot U_f^2 \quad (1-14)$$

avec  $\zeta$  un coefficient de perte de charge,  $V_f$  la vitesse de filtration en fût vide,  $\Omega$  la section amont ou aval du filtre et  $S_f$  la surface de filtration telles que :

$$V_f = U_f \cdot \frac{S_f}{\Omega} \quad (1-15)$$

En donnant une valeur approximative de la surface de filtration :

$$S_f = N_p \cdot L \cdot 2h \quad (1-16)$$

avec  $N_p$  le nombre de plis et  $L$  la longueur du pli, l'expression de la perte de charge  $\Delta P_0$  du filtre plissé vierge s'écrit :

$$\Delta P_0 = \Delta P_M + \zeta \cdot 2\rho \times \left( \frac{h}{p} \right)^2 \times U_f^2 \quad (1-17)$$

Le modèle a ensuite été ajusté avec les points expérimentaux de Del Fabbro (2001) afin de déterminer le coefficient empirique  $\zeta$ . Le coefficient  $\zeta \cdot 2\rho$  a pu être corrélé à la valeur du pas ; ainsi, le modèle s'écrit :

$$\Delta P_0 = \Delta P_M + \frac{0,3336}{p} \left( \frac{h}{p} \right)^2 \cdot U_f^2 \quad (1-18)$$

Tout comme le modèle de Del Fabbro (2001), lorsque  $\frac{h}{p} \rightarrow 0$ , la valeur de la perte de charge du filtre plissé vierge tend vers celle d'un filtre plan qui peut être déterminée expérimentalement, ou à partir des corrélations empiriques évoquées au paragraphe précédent si le medium filtrant est parfaitement caractérisé.

### I.3. Efficacité de filtration d'un medium vierge

#### I.3.1. Définitions

L'efficacité de filtration représente la statistique de collecte des particules par le filtre. Elle peut s'exprimer sous la forme de trois rapports :

- le rendement  $R_0$  qui exprime le rapport de la quantité de particules retenues par le filtre sur la quantité de particules incidentes :

$$R_0 = \frac{C_{\text{amont}} - C_{\text{aval}}}{C_{\text{amont}}} \times 100 \quad (1-19)$$

avec  $C_{\text{amont}}$  et  $C_{\text{aval}}$  les concentrations en particules respectivement en amont et en aval du filtre ;

- la perméance  $P$  qui représente le rapport de la quantité de particules non retenues par le filtre sur la quantité de particules incidentes :

$$P = \frac{C_{\text{aval}}}{C_{\text{amont}}} \quad (1-20)$$

- le coefficient d'épuration  $CE$  qui est l'inverse de la perméance :

$$CE = \frac{C_{\text{amont}}}{C_{\text{aval}}} = \frac{1}{P} \quad (1-21)$$

### I.3.2. Mécanismes de capture

En l'absence de forces extérieures, les principaux mécanismes qui concourent au piégeage des aérosols dans le milieu filtrant, et ainsi à l'efficacité de filtration, sont les suivants :

- la diffusion brownienne pour les particules de très petite taille ( $d_p < 0,5 \mu\text{m}$ ),
- l'interception pour les particules de taille intermédiaire ( $d_p > 0,5 \mu\text{m}$ ),
- l'impaction inertielle pour les particules de grosse taille ( $d_p > 1 \mu\text{m}$ ).

Il existe également des mécanismes de capture par sédimentation et par forces électrostatiques mais qui sont le plus souvent négligés.

### I.3.3. Efficacités unitaires de collecte (par fibre)

Deux approches se distinguent pour calculer l'efficacité unitaire de collecte d'une fibre. Toutes les deux sont fondées sur l'écoulement du fluide au voisinage d'un obstacle. La première consiste à calculer numériquement les trajectoires des aérosols et à déterminer celles qui ne subiront pas l'influence de la fibre. La seconde consiste à utiliser un modèle d'efficacité empirique ou théorique s'ajustant au mieux à des résultats expérimentaux (Thomas, 2001).

#### a. Etude de l'écoulement autour d'une fibre et d'un ensemble de fibres

Afin de pouvoir déterminer l'efficacité de collecte d'une fibre unique, il est nécessaire de connaître le champ d'écoulement autour de la fibre. Ceci s'avère difficile, étant donné que le medium a une structure irrégulière et complexe. C'est la raison pour laquelle des modèles, plus ou moins simplistes, ont été développés. Ces modèles considèrent que le medium est composé d'un assemblage de cylindres de même diamètre, parallèles et perpendiculaires à la direction du fluide. La résolution des équations de Navier-Stokes permet d'obtenir la fonction de courant relative aux composantes de la vitesse. Cette fonction fait intervenir un facteur hydrodynamique, variant selon les modèles et le régime hydrodynamique considéré, et qui est régi par le nombre de Knudsen de fibres  $Kn_f$  défini comme le rapport entre le libre parcours moyen  $\lambda$  des molécules de gaz et le diamètre  $d_f$  d'une fibre :

$$Kn_f = \frac{2\lambda}{d_f} \quad (1-22)$$

L'air étant un milieu discontinu, constitué par un ensemble de molécules en mouvement incessant,  $\lambda$  traduit la distance entre deux collisions ou encore la dimension des vides ; à température et pression normales, sa valeur pour l'air est de  $6,4 \cdot 10^{-8}$  m.

#### b. Capture par diffusion brownienne

Les particules submicroniques sont animées de mouvements browniens. De par cette agitation, il arrive qu'une particule dont la trajectoire moyenne passe suffisamment près de la fibre soit collectée par cette dernière (Cf. figure 1-4).

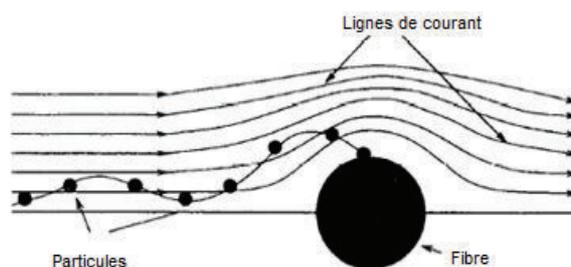


Figure 1-4 : Schématisation du mécanisme de collecte par diffusion brownienne (Del Fabbro, 2001)

Le mouvement des particules par diffusion brownienne peut être quantifié par le coefficient de diffusion  $D$  corrigé par le coefficient de Cunningham  $Cu$  :

$$D = \frac{k_B \cdot T \cdot Cu}{3\pi \cdot \mu \cdot d_p} \quad (1-23)$$

avec  $k_B$  la constante de Boltzmann ( $k_B = 1,37 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ ) et  $T$  la température du milieu.

Le coefficient de Cunningham  $Cu$  est un facteur de correction qui tient compte des discontinuités du milieu, lorsque la taille des particules est proche de la valeur du libre parcours moyen du gaz. Sa valeur dépend du nombre de Knudsen de particules  $Kn_p$  défini par la relation :

$$Kn_p = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (1-24)$$

Millikan (1923), cité par Bau (2006), a proposé d'utiliser une expression exponentielle à trois paramètres adimensionnels pour exprimer le facteur de correction  $Cu$  :

$$Cu = 1 + Kn_p \cdot \left( A + B \cdot \exp\left(-\frac{C}{Kn_p}\right) \right) \quad (1-25)$$

De nombreux auteurs ont tenté d'optimiser les valeurs empiriques des constantes  $A$ ,  $B$  et  $C$  en fonction de leur système étudié. Le tableau 1-3 fournit les valeurs de Kim *et al.* (2005), cités par Bau (2006), déterminées expérimentalement avec du PSL (polystyrène latex) pour des diamètres de particules compris entre 0,02 et 0,27  $\mu\text{m}$ .

Tableau 1-3 : Valeurs expérimentales des constantes  $A$ ,  $B$  et  $C$  pour le calcul du facteur de Cunningham selon Kim *et al.* (2005)

A	1,165
B	0,483
C	0,997

Le facteur de correction  $Cu$  augmente avec le nombre de Knudsen, i. e. à mesure que le diamètre des particules diminue. Asymptotiquement,  $Cu$  tend vers 1 lorsque les particules sont de grande dimension ( $Kn_p \ll 1$ ). Selon la valeur de  $Kn_p$ , la continuité du milieu peut être caractérisée en trois régimes :

- $Kn_p \ll 1$  : domaine continu

La dimension des particules est grande (de l'ordre du micromètre) devant le libre parcours moyen des molécules de gaz et le gaz est donc considéré comme un milieu continu. Dans ces conditions, il est possible de caractériser l'écoulement autour de la particule par un nombre de Reynolds  $Re_p$ , tel que :

$$Re_p = \frac{\rho \cdot d_p \cdot U_p}{\mu} \quad (1-26)$$

avec  $U_p$  la vitesse relative de l'aérosol par rapport au fluide. Le tableau 1-4 classe le type d'écoulement en fonction de la valeur du nombre de Reynolds de particules. Dans ce domaine, le comportement des aérosols est décrit par l'aérodynamique.

Tableau 1-4 : Régime d'écoulement en fonction du nombre de Reynolds de particules

Nature de l'écoulement	$Re_p$
Écoulement laminaire	< 1
Écoulement intermédiaire	1 - 1000
Écoulement turbulent	> 1000

- $Kn_p \gg 1$  : domaine moléculaire

Les particules sont petites (de l'ordre du nanomètre à la dizaine de nanomètres) devant  $\lambda$ . Par les chocs incessants avec les molécules du gaz, les particules subissent des déplacements aléatoires caractérisés par la théorie cinétique des gaz : c'est le domaine moléculaire.

- domaine intermédiaire ou transitoire

Il correspond à des tailles de particules comprises entre la dizaine de nanomètres et le micromètre, dont le comportement est décrit par extrapolation du domaine moléculaire ou du domaine continu.

Le mécanisme de collecte par diffusion brownienne, ainsi que son efficacité associée, sont caractérisés par l'importance relative du mouvement diffusif comparé au mouvement de convection de l'air à travers le filtre. Le nombre adimensionnel associé est le nombre de Peclet  $Pe$  :

$$Pe = \frac{U_f \cdot d_f}{D} \quad (1-27)$$

Plus le diamètre des particules est faible, plus le coefficient de diffusion est important et donc plus le nombre de Peclet diminue.

Il existe de nombreuses expressions recensées dans la littérature donnant l'efficacité unitaire de capture par diffusion brownienne (Thomas, 2001). Le modèle de Lee et Liu (1982) peut être cité :

$$\eta_d = 2,6 \cdot \left( \frac{1-\alpha}{H_{Ku}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Pe^{-\frac{2}{3}} \quad (1-28)$$

avec  $H_{Ku}$  le facteur hydrodynamique selon Kuwabara (1959) qui s'exprime selon la relation :

$$H_{Ku} = \alpha - 0,5 \ln \alpha - 0,25\alpha^2 - 0,75 \quad (1-29)$$

### c. Capture par interception

Une particule de diamètre  $d_p$ , portée par la veine gazeuse, est captée par une fibre si son centre de gravité passe à une distance inférieure à  $\frac{d_p}{2}$  de cette dernière (Cf. figure 1-5).

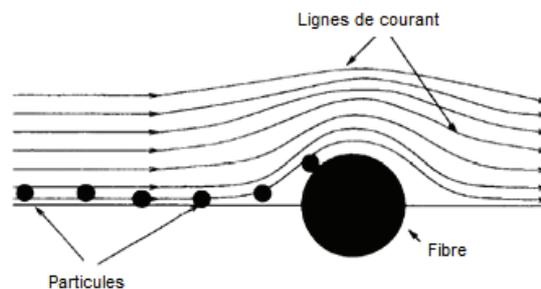


Figure 1-5 : Schématisation du mécanisme de collecte par interception (Del Fabbro, 2001)

L'efficacité de collecte est d'autant plus grande que le diamètre de la particule est grand et le diamètre de la fibre petit. Le nombre adimensionnel associé à ce mécanisme est le nombre d'interception  $I$  :

$$I = \frac{d_p}{d_f} \quad (1-30)$$

Comme pour le mécanisme de diffusion, de très nombreuses relations existent dans la littérature pour définir l'efficacité unitaire de capture par interception (Thomas, 2001), dont celle de Lee et Liu (1982) :

$$\eta_i = 0,6 \cdot \left( \frac{1-\alpha}{H_{Ku}} \right) \cdot \left( \frac{I^2}{1+I} \right) \quad (1-31)$$

#### d. Capture par impaction inertielle

Le mécanisme de capture par impaction inertielle est lié à la modification de la trajectoire de la veine gazeuse contournant une fibre du medium (Cf. figure 1-6). En effet, une particule possédant une certaine inertie ne peut pas contourner l'obstacle, mais continue sa trajectoire initiale et le heurte. Une particule est ainsi captée d'autant plus facilement qu'elle est lourde et que sa vitesse d'approche est grande.

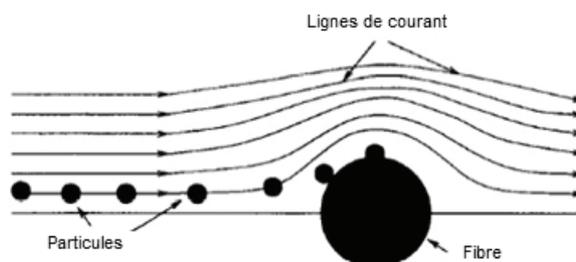


Figure 1-6 : Schématisation du mécanisme de collecte par impaction inertielle (Del Fabbro, 2001)

L'étude de ce mécanisme est complexe ; néanmoins, il est établi que l'efficacité de capture par impaction croît avec le nombre de Stokes  $St$  :

$$St = \frac{Cu \cdot \rho_p \cdot U_f \cdot d_p^2}{18\mu \cdot d_f} \quad (1-32)$$

avec  $\rho_p$  la masse volumique des particules. Comme pour les deux mécanismes précédents, il existe dans la littérature des expressions donnant l'efficacité unitaire de collecte par impaction inertielle (Thomas, 2001) ; celle de Gougeon (1994) peut être citée :

$$\eta_i = 0,0334St^{\frac{3}{2}} \quad (1-33)$$

#### e. Influence de divers paramètres sur l'efficacité de collecte

L'importance relative des mécanismes est fonction des caractéristiques de la particule (diamètre et masse volumique), des conditions opératoires telles que la vitesse de filtration, et enfin des caractéristiques du medium filtrant (diamètre des fibres, compacité et épaisseur). Le tableau 1-5 résume l'ensemble des connaissances actuelles relatif à l'influence de ces paramètres sur l'efficacité de collecte des filtres à fibres par diffusion, interception et inertie.

Tableau 1-5 : Influence de divers paramètres intrinsèques à l'aérosol, au filtre et à la filtration, sur l'efficacité de capture par diffusion, interception et impaction inertielle (Thomas, 2001)

Efficacité de collecte	Aérosol		Conditions opératoires	Caractéristiques du filtre		
	$\rho_p \nearrow$	$d_p \nearrow$	$U_f \nearrow$	$d_f \nearrow$	$\alpha \nearrow$	$Z \nearrow$
Diffusion	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\nearrow$	$\nearrow$
Interception	--	$\nearrow$	--	$\searrow$	$\nearrow$	$\nearrow$
Impaction	$\nearrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\searrow$	$\nearrow$	$\nearrow$

### I.3.4. Efficacité globale d'un filtre

#### a. Définition

Pour une couche filtrante d'épaisseur  $Z$ , un coefficient d'épuration  $CE_j$  peut être calculé pour chaque mécanisme  $j$  (diffusion, interception et impaction) par la relation :

$$CE_j = \exp\left(\frac{4\alpha}{\pi \cdot (1-\alpha) \cdot d_f} \cdot Z \cdot \eta_j\right) \quad (1-34)$$

avec  $\eta_j$  l'efficacité unitaire de collecte pour le mécanisme  $j$ . Pour tous les mécanismes, le coefficient d'épuration global du filtre  $CE$  est calculé par la relation :

$$CE = \exp\left(\frac{4\alpha}{\pi \cdot (1-\alpha) \cdot d_f} \cdot Z \cdot \sum_{j=1}^3 \eta_j\right) \quad (1-35)$$

Il correspond à l'efficacité initiale du filtre, soit en d'autres termes, à l'efficacité du filtre vierge.

### b. Modélisation

La majorité des auteurs considère que l'efficacité globale d'un filtre à fibres est le produit des probabilités des efficacités de collecte par diffusion, interception et impaction, considérées chacune indépendantes des autres.

Thomas (2001) a répertorié les différents modèles d'efficacité empiriques ou théoriques, disponibles dans la littérature et les a comparés à des valeurs expérimentales obtenues sur des media filtrants plans ; il constate qu'aucune des relations inventoriées ne donne un bon accord avec l'ensemble des résultats expérimentaux. L'explication avancée est que toutes ces relations sont fondées sur des modèles d'écoulement autour d'un arrangement idéalisé de fibres, comme des fibres cylindriques lisses ou des particules sphériques, vraisemblablement trop éloignés de la réalité.

A titre d'exemple, la figure 1-7 représente l'efficacité globale de filtration selon le modèle de Gougeon (1994) défini par les corrélations empiriques de Lee et Liu (1982) pour les mécanismes de diffusion brownienne et d'interception, et par sa propre corrélation (Gougeon, 1994) pour le mécanisme d'impaction inertielle. L'efficacité est calculée pour des particules d'uranine de  $1500 \text{ kg.m}^{-3}$  de masse volumique, un medium filtrant dont les caractéristiques géométriques correspondent à un filtre THE ( $\alpha=0,071$  ;  $d_f=0,9 \text{ }\mu\text{m}$  ;  $Z=521 \text{ }\mu\text{m}$ ) et une vitesse de filtration de  $2,5 \text{ cm.s}^{-1}$ .

La notion de plissage du filtre n'a vraisemblablement pas d'influence sur l'efficacité d'un filtre vierge. Ainsi, un filtre plan et un filtre plissé composés du même medium et testés dans les mêmes conditions aérauliques, auront la même efficacité si l'étanchéité des filtres respectifs montés dans leur support est identique. Dans la réalité industrielle, la conception même d'un filtre plissé, dont le medium est agencé dans une armature elle-même introduite dans un caisson filtrant, fait que l'absence de fuite est peu probable. Aucune comparaison entre les résultats donnés par les modèles d'efficacité et des valeurs expérimentales sur des filtres industriels n'a été recensée dans la littérature.

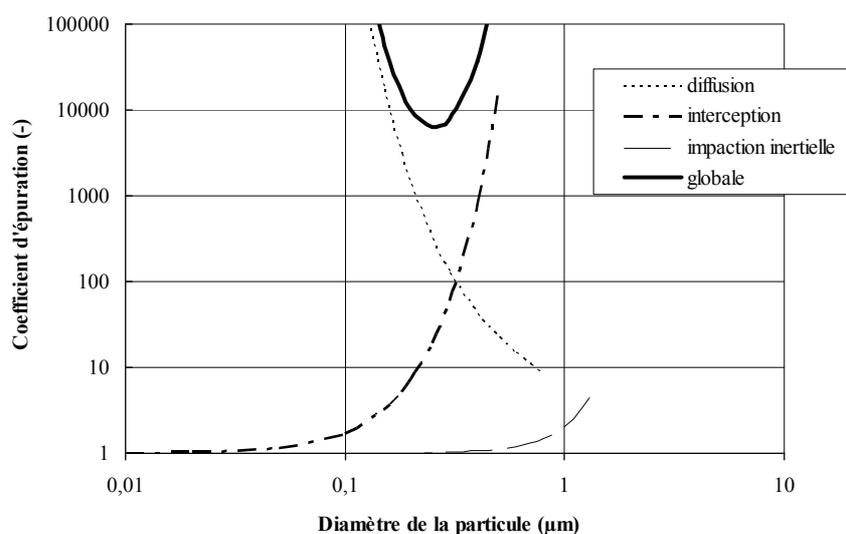


Figure 1-7 : Efficacités globale et unitaires d'un filtre vierge THE calculées selon le modèle théorique de Gougeon (1994)

## I.4. Adhésion et réentraînement des particules

Une particule qui se fixe sur un collecteur, que ce soit une fibre ou une autre particule, ne sera pas réentraînée si la force d'adhésion est suffisante devant la force aérodynamique.

### I.4.1. Forces d'adhésion

Les trois principales forces responsables de l'adhésion des particules sur une surface sont les forces de Van der Waals, les forces électrostatiques et les forces capillaires (Alloul-Marmor, 2002).

#### a. Forces de Van der Waals

Les forces de Van der Waals sont des forces moléculaires. L'origine de ces forces est liée à la structure des atomes ou des molécules du matériau, qui peuvent être considérés comme des dipôles oscillants : il y a polarisation des atomes ou des molécules, i. e. modification de la répartition des électrons et des particules négatives, due à la présence d'un champ électrique local dans le matériau. Les forces de Van der Waals sont donc une combinaison de plusieurs forces séparées, telles que les forces de dipôles permanents, les forces de dipôles induits et les forces de dispersion. Les forces de dispersion, appelées également forces de London - Van der Waals, ont généralement la contribution la plus importante, c'est pourquoi les forces de Van der Waals sont souvent assimilées aux forces attractives de London – Van der Waals.

Pour deux corps de taille  $d_{p_1}$  et  $d_{p_2}$  cette force s'écrit :

$$F_{VdW} = \frac{A}{12z^2} \cdot \frac{d_{p_1} \cdot d_{p_2}}{(d_{p_1} + d_{p_2})} \quad (1-36)$$

avec  $A$  la constante de Hamaker et  $z$  (m) la distance entre la surface des deux corps. La valeur de la constante de Hamaker est propre aux différents matériaux qui constituent la particule et la surface ainsi qu'au milieu dans lequel est placé le système.

#### b. Forces électrostatiques

Deux types de forces électrostatiques existent :

- les forces provenant de l'interaction électrostatique produite par la charge électrique de la particule ou de la surface, appelées forces images ou forces coulombiennes. Le mécanisme de ces forces repose sur l'induction dans la surface d'une charge identique mais de signe opposé à celle de la particule. Ce sont en fait des forces d'influence qui agissent peu lorsqu'il y a contact. De plus, quand la surface est mise à la masse, la charge des particules en contact avec la surface n'est pas constante. En effet, les charges s'écoulent le long de la surface au cours du temps, diminuant ainsi la valeur des forces de Coulomb ;
- les forces de double-couche dues à la différence entre les surfaces en contact. Ces forces se développent au moment de la séparation de surfaces de nature différentes, qui se séparent chargées avec des signes opposés.

#### c. Forces capillaires

L'effet de capillarité est dû à l'apparition d'un film par condensation capillaire d'une vapeur entre une surface et la particule, qui a pour effet d'augmenter l'attraction entre les deux corps. Cet effet suppose donc la présence de vapeur dans le microenvironnement de contact. Les forces de capillarité proviennent de tensions de surface. Elles sont fonction notamment de la taille des particules et de la tension superficielle du film liquide  $\gamma$ .

Selon Hinds (1982), pour un contact parfaitement lisse entre une sphère et une surface plane et une humidité relative supérieure à 90 %, la force de capillarité  $F_{cap}$  s'écrit :

$$F_{cap} = 2\pi \cdot \gamma_1 \cdot d_p \quad (1-37)$$

Entre deux particules sphériques lisses, la condensation capillaire est illustrée sur la figure 1–8 et la force de capillarité s’écrit :

$$F_{\text{cap}} = 4\pi\gamma_1 \cdot \frac{\cos(\theta_1 + \beta_1) + \cos\theta_2}{2} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-38)$$

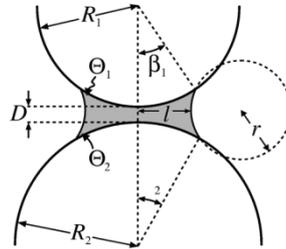


Figure 1–8 : Condensation capillaire entre deux particules sphériques de surface lisse (Butt and Kappl, 2009)

Ainsi, la force de capillarité dépend uniquement du diamètre de la particule et de la tension superficielle du liquide, mais pas de la pression de vapeur. Ceci n’est vrai qu’en présence d’une particule sphérique lisse et d’une surface plane, ou encore de deux particules sphériques ; pour d’autres géométries de contact ou encore lorsque les particules sont rugueuses, la force de capillarité évolue en fonction de l’humidité relative de l’air.

En effet, lorsque deux solides entrent en contact, celui-ci est établi au niveau des aspérités présentes en surface ; la rugosité réduit l’aire de contact et par conséquent la force de liaison. Avec des particules hydrophiles, Butt and Kappl (2009) définissent trois régimes, illustrés sur la figure 1–9 :

- pour de faibles pressions de vapeur, seul un pont capillaire se forme au niveau de l’aspérité la plus importante ; le calcul de la force de capillarité dépend essentiellement de la taille de l’aspérité ;
- à une pression de vapeur intermédiaire, de plus en plus de ponts liquides se forment,
- pour d’importantes pressions de vapeur, les ponts capillaires entre les particules forment un ménisque continu ; la rugosité est alors négligeable pour le calcul de la force de capillarité.

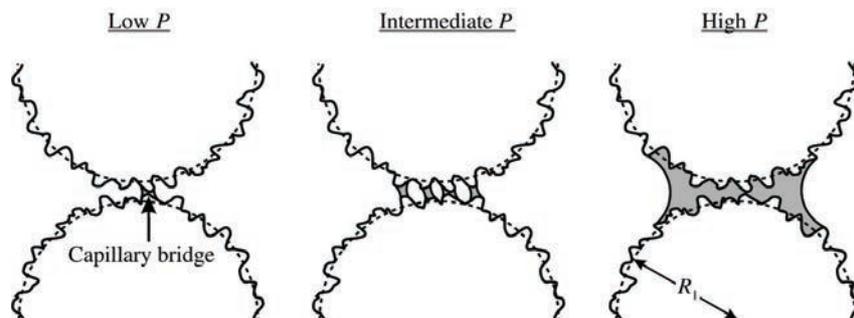


Figure 1–9 : Schématisation de deux particules rugueuses en contact à différentes pressions de vapeur (Butt and Kappl, 2009)

Ainsi, selon Butt and Kappl (2009), la présence de rugosités à la surface de particules hydrophiles diminue la force de capillarité, en particulier à faible pression de vapeur. Les auteurs prennent l’exemple de deux particules sphériques de 10  $\mu\text{m}$  et étudient l’influence de l’humidité relative sur la force capillaire entre les particules en faisant varier la taille des aspérités (modélisées par une forme rectangulaire). La figure 1–10 illustre les résultats obtenus. La force de capillarité est constante quelle que soit l’humidité relative de l’air lorsque les particules sont lisses ( $d_0 = 0$ ) ; pour des particules rugueuses, la force de capillarité est nulle en air sec et augmente lorsque l’humidité relative augmente. Les résultats révèlent également que la force de capillarité diminue lorsque la distance entre les deux particules augmente.

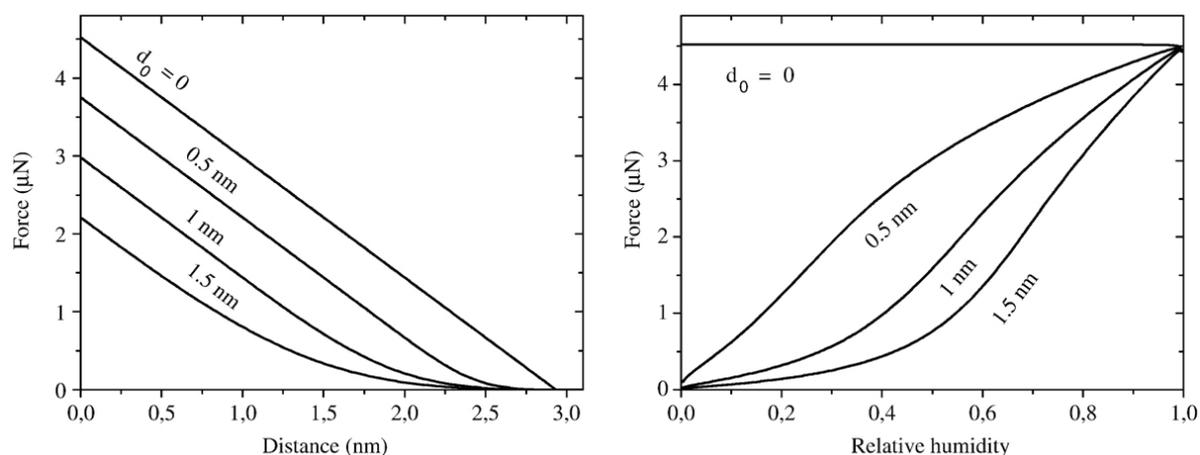


Figure 1-10 : Etude de la force de capillarité entre deux particules rugueuses de  $10\ \mu\text{m}$  en fonction de la taille des aspérités ; à gauche influence de la distance entre les particules, à droite influence de l'humidité relative (Butt and Kappl, 2009)

Corn (1961), cité par Hinds (1982), propose une corrélation empirique reliant la force d'adhésion  $F_{\text{adh}}$  entre une particule et une surface plane en fonction de l'humidité relative (HR) :

$$F_{\text{adh}} = 0,063d_p \cdot (1 + 0,009\text{HR}) \quad (1-39)$$

avec HR en pourcentage. Cette corrélation a été établie à partir de mesures directes effectuées avec des particules de verre et de quartz.

#### I.4.2. Forces aérodynamiques

Les principales forces intervenant dans le détachement des particules sont :

- la force de traînée (force opposée à la direction principale de l'écoulement),
- la force de portance (force verticale opposée à la gravité).

Ces deux forces étant proportionnelles à une puissance de  $d_p$ , cela suggère que pour une vitesse donnée, plus la taille des particules augmente, plus le détachement est aisé. De plus, ces forces proviennent de l'écoulement et suivent donc aussi des lois en puissance de la vitesse de frottement de l'air à la paroi.

#### I.4.3. Influence de divers paramètres

Les forces d'adhésion sont affectées par :

- des paramètres liés aux particules : la granulométrie, la morphologie, le type de dépôt, sa porosité, son homogénéité (un dépôt inhomogène conduit à un effet de dénudation, i. e. un réentraînement des particules par plaque), la teneur en eau, et enfin, le vieillissement du dépôt,
- des phénomènes interparticulaires : l'agglomération des particules et la saltation (les grosses particules,  $d_p > 100\ \mu\text{m}$ , retombant sous l'effet de leur poids, se déplacent par petits bonds successifs),
- des paramètres liés à la surface du dépôt : type de surface et rugosité,
- des paramètres liés au milieu environnement : la durée d'exposition, l'humidité relative et la température.

Les forces aérodynamiques sont affectées par les caractéristiques de l'écoulement telles que la vitesse ou bien la turbulence.

### Bilan

*La première partie de ce chapitre a permis de décrire les filtres utilisés d'un point de vue technologique, mais surtout d'appréhender les mécanismes de base à l'origine de la collecte des particules, à savoir la diffusion brownienne, l'impaction inertielle et l'interception.*

*La taille de l'aérosol à piéger joue un rôle essentiel sur l'efficacité de collecte. En effet, selon le diamètre de l'aérosol, la contribution de chaque mécanisme de piégeage sur l'efficacité globale du filtre est plus ou moins importante. L'efficacité globale passe par un minimum (MPPS) pour un diamètre d'aérosol proche de  $0,1 \mu\text{m}$  ; c'est donc pour cette classe granulométrique que la mesure d'efficacité des filtres THE est effectuée dans le domaine nucléaire. De plus, cette efficacité dépend de la vitesse de filtration.*

*La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de la filtration au cours du temps d'aérosols solides en air sec et pour les deux géométries de filtres, plane et plissée.*

## **II. FILTRATION D'AEROSOLS SOLIDES**

Cette partie est consacrée à l'étude des performances d'un filtre durant son colmatage avec un aérosol solide, ainsi qu'à l'influence de divers paramètres ; les différents modèles de colmatage présents dans la littérature sont également abordés en fin de partie.

### **II.1. Evolution des performances d'un filtre**

La filtration d'aérosols solides sur media fibreux THE fait l'objet de nombreuses études, notamment avec des filtres de géométrie plane, mieux adaptés aux conditions de laboratoire et utilisés par exemple en tant que filtres de prélèvement pour la surveillance environnementale. Cependant, l'évolution des performances d'un filtre THE durant son colmatage par un aérosol solide diffère selon sa géométrie.

#### II.1.1. Filtre plan

Le colmatage d'un filtre à fibres par un aérosol solide provoque une augmentation de sa perte de charge et de son efficacité. Walsh (1996), confirmé par Pénicot-Bauge (1998), décrit l'évolution de la perte de charge et de l'efficacité d'un filtre THE plan, illustrée sur la figure 1–11, en trois phases :

- durant les premiers instants du colmatage, la perte de charge du filtre augmente très lentement. Walsh (1996) explique que les particules se déposent essentiellement au sein du medium filtrant, ce qui n'affecte pas de façon significative l'écoulement du fluide. La pénétration des particules au sein du filtre varie peu durant cette première phase, nommée filtration en profondeur ;
- la seconde phase, appelée zone de transition, coïncide avec la formation d'un dépôt de particules à la surface du filtre, lequel conduit à une variation exponentielle de sa perte de charge ;
- durant la troisième phase, la croissance de la perte de charge du filtre est linéaire, ainsi que la chute de la perméance. A ce stade du colmatage, le dépôt est suffisamment important (épaisseur du gâteau), pour assurer majoritairement la collecte des particules.

Dans le cas de filtres THE, les deux premières phases sont très souvent difficiles à observer compte tenu de leur faible durée dans le temps.

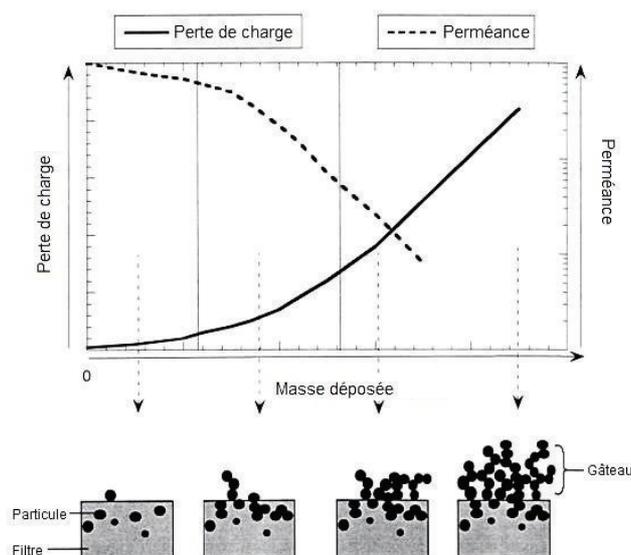


Figure 1-11 : Evolution de la perte de charge et de la perméance d'un filtre THE plan durant son colmatage par un aérosol solide (Pénicot-Bauge, 1998)

### II.1.2. Filtre plissé

Del Fabbro (2001) décrit l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé, durant son colmatage par un aérosol solide, en trois étapes successives (Cf. figure 1-12) :

- une filtration en profondeur, correspondant, comme pour les filtres plans, à un dépôt des particules à l'intérieur du medium ; durant cette étape, la perte de charge du filtre évolue peu ;
- une filtration en surface, relative au développement d'un gâteau de particules à la surface du medium. Cette étape est également commune aux filtres plans mais elle s'accompagne pour les filtres plissés d'une réduction de la surface de filtration au fur et à mesure que le gâteau de particules se forme. Néanmoins, la réduction de la surface de filtration est suffisamment faible pour que l'évolution de la perte de charge du filtre soit linéaire. Durant cette étape et conformément aux résultats observés sur filtres plans, Callé-Chazelet *et al.* (2008 a) ont observé une diminution de la perméance des particules de fluorescéine sodée de  $0,18 \mu\text{m}$  de diamètre en fonction de la masse de ces mêmes particules collectées sur le filtre ;
- durant la troisième étape, la réduction de la surface de filtration devient très significative, ce qui entraîne une augmentation exponentielle de la perte de charge.

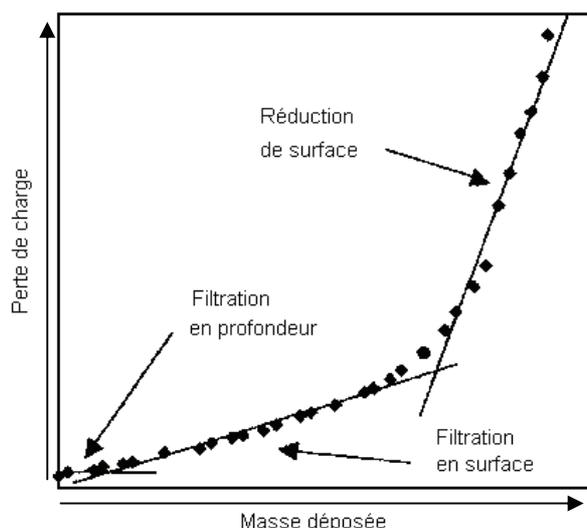


Figure 1-12 : Colmatage en trois phases d'un filtre THE plissé par un aérosol solide (Del Fabbro, 2001)

## II.2. Influence de divers paramètres

L'influence de divers paramètres sur le colmatage, par un aérosol solide, d'un filtre THE plan ou plissé est étudiée dans ce paragraphe : la taille des particules, la vitesse de filtration, la concentration de l'aérosol et la géométrie de plissage dans le cas des filtres plissés.

### II.2.1. Influence de la taille des particules

La géométrie du dépôt diffère selon la taille des particules : pour des particules submicroniques, le dépôt est dendritique comme le montre la figure 1–13, alors que pour des particules microniques, le dépôt, illustré sur la figure 1–14, se présente sous forme d'agglomérats.

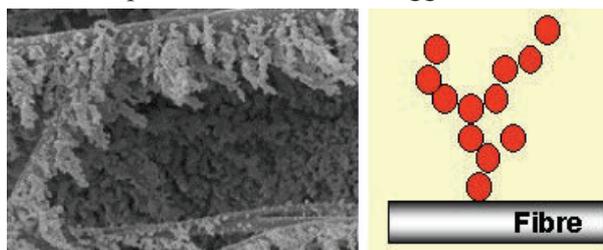


Figure 1–13 : Colmatage d'une fibre par un aérosol solide submicronique (Thomas, 2001)

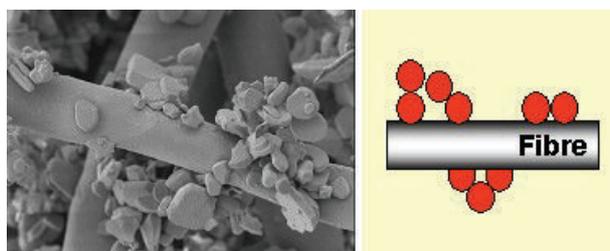


Figure 1–14 : Colmatage d'une fibre par un aérosol solide micronique (Thomas, 2001)

Thomas (2001) explique que dans le premier cas, le dépôt est plus aéré et donc de faible compacité. Néanmoins, les particules ayant un faible diamètre, leur surface spécifique est d'autant plus grande, ce qui conduit à une plus grande perte de charge du filtre. Inversement, pour les plus grosses particules, le dépôt a une plus grande compacité, mais la surface spécifique étant plus faible que pour les particules submicroniques, cela conduit à une perte de charge moins importante pour une même masse de particules déposées. Ainsi, plus les particules sont petites, plus la perte de charge est grande pour une même masse de particules déposées ; de même, la zone de transition apparaît pour une masse surfacique de particules collectées d'autant plus faible que le diamètre des particules est petit.

Concernant l'efficacité de filtration, Thomas *et al.* (2001) montrent pour des filtres plans que des particules de 0,18  $\mu\text{m}$  de diamètre pénètrent plus profondément dans le medium que des particules de 0,31  $\mu\text{m}$ .

Pour les filtres plissés, les observations sont les mêmes que sur filtres plans. Del Fabbro (2001) montre qu'en travaillant à même vitesse de filtration et pour une même masse de particules déposées, l'augmentation de la perte de charge est d'autant plus importante que le diamètre des particules est petit.

### II.2.2. Influence de la vitesse de filtration

Pour étudier l'influence de la vitesse de filtration, il est nécessaire de s'affranchir de l'augmentation de la perte de charge proportionnelle à l'augmentation de la vitesse de filtration. Ainsi, l'évolution de la perte de charge du filtre durant son colmatage est représentée à l'aide du rapport  $\frac{\Delta P}{U_f}$  entre la perte de charge et la vitesse de filtration, en fonction de la masse surfacique de particules déposées.

Dans le cas des filtres plissés, l'évolution de la perte de charge est couramment représentée à partir du rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  entre la perte de charge du filtre et sa perte de charge initiale.

L'influence de la vitesse de filtration sur les performances d'un filtre THE est étudiée, d'une part en fonction de la taille de l'aérosol, puisque cette dernière a une influence sur la structure même du gâteau de particules formé, d'autre part en fonction de la géométrie du filtre.

#### a. Filtre plan

##### Aérosol solide submicronique

Pénicot-Bauge (1998) n'a observé aucune influence de la vitesse de filtration sur l'évolution du rapport  $\frac{\Delta P}{U_f}$  des filtres durant leur colmatage avec des particules submicroniques de 0,18 et 0,40  $\mu\text{m}$  et dans une gamme de vitesse de 1 à 50  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Briand *et al.* (1998) font la même observation avec des aérosols de combustion polydispersés. Thomas (2001) explique que la taille des particules collectées implique une collecte essentiellement par diffusion, qui est un mécanisme peu influencé par la vitesse de filtration.

Aucune étude n'a été recensée dans la littérature concernant l'influence de la vitesse de filtration sur l'efficacité d'un filtre plan colmaté avec un aérosol submicronique.

##### Aérosol solide micronique

Pour des filtres THE plans en fibres de verre colmatés avec des particules microniques solides, il n'existe aucune donnée consolidée sur l'influence de la vitesse de filtration sur l'évolution de la perte de charge.

Merlin *et al.* (2000) montrent que la nature de la fibre est prépondérante dans l'arrangement des particules sur le medium filtrant. En effet, les auteurs montrent que pour un medium de moyenne efficacité, constitué de fibres de verre colmatées avec des particules d'alumine de 2  $\mu\text{m}$ , l'évolution du rapport  $\frac{\Delta P}{U_f}$  est indépendant de la vitesse de filtration ; ce n'est pas le cas pour un medium à base de

fibres de cellulose pour lequel plus la vitesse de filtration diminue, plus le rapport  $\frac{\Delta P}{U_f}$  est important pour une même masse de particules collectées.

Cheng et Tsai, cités par Del Fabbro (2001), montrent que le rapport  $\frac{\Delta P}{U_f}$  augmente lorsque la vitesse de filtration augmente également. Les auteurs ont travaillé avec des filtres de nature non précisée et avec trois sortes de particules : de la suie de 6,5  $\mu\text{m}$  de diamètre aérodynamique médian massique, de la roche calcaire de 2,5  $\mu\text{m}$  de diamètre et de la poussière SAE de 4  $\mu\text{m}$  de diamètre.

Concernant l'influence de la vitesse de filtration sur l'efficacité d'un filtre plan colmaté par un aérosol micronique, Walsh (1996) présente des résultats pour un medium fibreux de compacité égale à 12 % de nature indéterminée mais qui n'est vraisemblablement pas en fibres de verre. L'auteur montre que pour une même masse de particules déposées, l'efficacité est d'autant plus grande que la vitesse de filtration l'est aussi, conformément aux mécanismes de filtration.

#### b. Filtre plissé

Comme pour les filtres plans, l'influence de la vitesse de filtration sur l'évolution des performances du filtre doit être examinée en fonction de la granulométrie de l'aérosol.

##### Aérosol micronique

Del Fabbro (2001) montre que, pour une même masse de particules microniques collectées, le rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  est d'autant plus important que la vitesse est faible. L'auteur propose deux explications :

- la première est d'ordre mécanique : une augmentation de la vitesse de filtration, et donc du débit de filtration, entraîne un meilleur écartement des plis les uns par rapport aux autres. La réduction de surface de filtration est retardée, ce qui induit, pour une même masse de particules déposées, un rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  plus faible en comparaison à un colmatage à une vitesse de filtration plus faible ;
- la seconde explication concerne le dépôt des particules qui se ferait différemment selon la vitesse de filtration (Cf. figure 1-15). En effet, l'augmentation de la vitesse de filtration favorise l'inertie des particules et donc un dépôt préférentiel des particules dans le creux des plis. Ce dépôt entraîne une répartition hétérogène des particules et ainsi, offre à l'écoulement une surface de filtration moins résistante, donc un rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  plus faible. A faible vitesse de filtration, l'arrangement progressif des particules le long des plis crée une obturation des plis plus rapide qu'à forte vitesse et induit donc, pour une même masse de particules déposées, un rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  plus important en comparaison à un colmatage à une vitesse plus élevée.

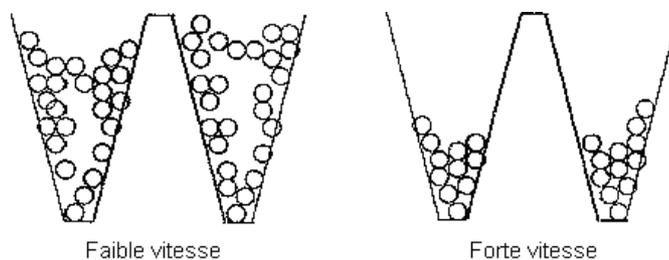


Figure 1-15 : Deux configurations de dépôt de particules solides microniques dans un filtre THE, selon la vitesse de filtration (Del Fabbro, 2001)

Aucune étude n'a été recensée dans la littérature concernant l'influence de la vitesse de filtration sur l'efficacité d'un filtre plissé colmaté avec un aérosol micronique.

#### Aérosol submicronique

Callé-Chazelet *et al.* (2008 a), en travaillant avec un aérosol submicronique d'uranine de 0,18  $\mu\text{m}$  de diamètre aérodynamique, montrent que pour une même masse de particules collectées, le rapport de la perte de charge du filtre sur la vitesse de filtration est d'autant plus important que la vitesse de filtration est grande. Deux hypothèses sont avancées pour expliquer ces résultats :

- la vitesse de filtration aurait une influence sur la structure au sein du gâteau de particules formé ;
- si le régime d'écoulement n'est plus laminaire, il n'est plus possible d'appliquer la loi de Darcy sur laquelle se fonde l'expression de la résistance aéraulique du support (représentée par le rapport de la perte de charge du filtre sur la vitesse de filtration). La perte de charge pourrait être fonction de la vitesse de filtration selon une relation polynomiale de degré 2 afin d'être représentatif de la résistance aéraulique du medium filtrant colmaté.

Briand *et al.* (1998) n'observent pas les mêmes résultats avec un aérosol de chlorure de sodium de 0,7  $\mu\text{m}$  de diamètre. En effet, les résultats indiquent qu'en début de colmatage, la vitesse de filtration n'a pas d'influence sur le rapport des pertes de charge du filtre colmaté et du filtre vierge ; puis, la diminution de la vitesse de filtration, comme avec l'aérosol micronique, conduit à un plus grand rapport des pertes de charge du filtre pour une même masse d'aérosol déposé. Les résultats de Callé-Chazelet *et al.* (2008 a) et Briand *et al.* (1998) semblent contradictoires mais peuvent peut-être s'expliquer par la taille des aérosols utilisés. En effet, l'aérosol de chlorure de sodium de 0,7  $\mu\text{m}$  de diamètre aérodynamique a vraisemblablement un comportement plus proche des aérosols microniques utilisés par Del Fabbro (2001) que de l'aérosol submicronique utilisé par Callé-Chazelet *et al.* (2008 a).

Concernant l'influence de la vitesse de filtration sur l'efficacité d'un filtre plissé colmaté avec un aérosol submicronique, seuls les travaux de Mocho et Lelandais (2008) ont été recensés dans la littérature ; ces travaux sont intégrés dans le cadre d'un Programme d'Intérêt Commun (PIC) entre l'IRSN et AREVA NC. Les auteurs ont travaillé avec des filtres THE à petits plis colmatés jusqu'à 80 daPa avec un aérosol de chlorure de sodium de 0,17  $\mu\text{m}$  de diamètre médian massique. Les auteurs ont testé deux débits de filtration (2500 et 3400  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) pour les mesures de coefficient d'épuration, ainsi que trois granulométries différentes de l'aérosol d'uranine pour la mesure : 0,12-0,15 et 0,24  $\mu\text{m}$  de diamètre médian massique. Pour les trois diamètres d'aérosol d'uranine testés, les résultats montrent que l'augmentation de la vitesse de filtration conduit à une diminution du coefficient d'épuration du filtre.

### II.2.3. Influence de la concentration

Pénicot-Bauge (1998) a étudié l'influence de la concentration en particules d'uranine de 0,18  $\mu\text{m}$  de diamètre aérodynamique sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre plan THE. Pour une même masse de particules déposées et pour des concentrations en particules variant de 5 à 15  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , Pénicot-Bauge (1998) n'a pas observé d'influence de la concentration sur l'évolution de la perte de charge du filtre durant son colmatage.

Pour des particules microniques, des essais effectués sur des media à base de fibres de cellulose ou de polyester par Callé (2000), avec des concentrations variant de 300 à 600  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , confirment les résultats précédents.

### II.2.4. Influence de la géométrie du plissage

L'influence des paramètres géométriques du filtre sur le colmatage des filtres plissés THE, entrepris par Del Fabbro (2001) avec des particules microniques, est complexe. En effet, les résultats ont révélé que, pour une hauteur de pli donnée, le rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  augmente lorsque la distance entre deux plis diminue, ceci lors du colmatage des filtres à une vitesse de filtration de 1  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Le résultat est différent pour un colmatage à une vitesse de filtration plus élevée. Il y a donc un couplage entre les effets des paramètres géométriques du plissage et ceux des paramètres aérauliques, qui, à ce jour, n'a pas encore été clarifié.

### II.2.5. Cas des aérosols de combustion

Mocho et Ouf (2009) ont étudié le colmatage de filtres THE industriels par des aérosols formés en cas de feux de matériaux solides. Différents combustibles ont été étudiés : du polyméthacrylate de méthyle (PMMA), du LEXAN (plaque de polycarbonate transparente) et du polychlorure de vinyle (PVC). En fonction du pourcentage de chaque matériau dans le mélange de combustion, l'aérosol formé a une teneur en condensats plus ou moins importante : un aérosol formé uniquement de PMMA a une teneur en condensats de 2 % alors que celle d'un mélange PMMA/PVC de 50/50 en masse est de 35 %. Les aérosols émis sont composés d'agrégats de particules primaires ; ces agrégats sont très polydispersés et ont un diamètre aérodynamique médian massique compris entre 0,7 et 1,8  $\mu\text{m}$ . La nature des particules primaires est plus ou moins solide ou liquide en fonction de la teneur en condensats.

Mocho et Ouf (2009) ont étudié tout d'abord l'influence de la vitesse de filtration avec un aérosol issu de la combustion de PMMA. Les auteurs observent qu'une diminution de la vitesse de filtration entraîne une augmentation du rapport entre la résistance aéraulique du filtre et sa résistance initiale, pour une même masse d'aérosols déposés. Comme pour des particules microniques, Mocho et Ouf (2009) attribuent ce phénomène à une hétérogénéité initiale de l'écoulement d'air dans le filtre plissé et à l'arrangement des particules le long de la hauteur des plis conduisant à une réduction de la surface utile de filtration d'autant plus importante que la vitesse de filtration est faible.

L'influence de la teneur en condensats dans les aérosols (entre 2 et 35 %) a également été étudiée. Les résultats de Mocho et Ouf (2009) indiquent que plus la teneur en condensats est élevée, plus le rapport des résistances aérauliques est faible pour une même masse d'aérosols déposés.

### II.3. Modélisation

Ce paragraphe présente quelques modèles d'évolution de la perte de charge de filtres THE durant leur colmatage en fonction de leur géométrie plane ou plissée.

#### II.3.1. Filtre plan

##### a. Point de transition

Pénicot-Bauge (1998) et Thomas (2001) définissent le point de transition comme l'intersection entre les deux tangentes aux courbes de filtration en profondeur et de filtration en surface. Pénicot-Bauge (1998) montre que la valeur du point de transition  $W_T$ , i. e. la valeur de la masse de particules déposées correspondant à l'intersection entre les deux tangentes expérimentales, dépend de plusieurs paramètres :

- la taille des particules :  $W_T$  augmente avec la taille des particules,
- la taille des fibres : la valeur de  $W_T$  est d'autant plus grande que la taille des fibres est élevée (pour une même compacité du medium),
- la compacité du medium : selon Walsh (1996), la valeur de  $W_T$  est d'autant plus grande que la compacité du medium est faible.

Japuntich (1994) et Thomas (2001) ont élaboré des modèles permettant de déterminer ce point de transition.

##### b. Filtration en profondeur

Il existe différentes relations permettant d'exprimer l'évolution de la perte de charge d'un filtre THE plan durant les premiers instants du colmatage (colmatage en profondeur). L'ensemble des modèles repose sur un dépôt de type dendritique ou sous forme d'agglomérats. Certains auteurs supposent une répartition homogène des particules sur la totalité de l'épaisseur du filtre : Davies (1973), Juda et Chrosciel (1970), Bergman *et al.* (1978) ; d'autres tiennent compte du profil de pénétration : Letourneau *et al.* (1990), Kanaoka et Hiragi (1990), Payatakes (1976). Les modèles tenant compte du profil de pénétration sont plus réalistes mais sont compliqués d'utilisation ou emploient des coefficients difficiles à déterminer.

##### c. Filtration en surface : Modèle de Novick (1992)

Le colmatage est dit en surface, lorsque les particules sont collectées sur la face amont du filtre et forment un dépôt d'épaisseur variable. Un seul modèle a été recensé pour décrire la filtration en surface : le modèle de Novick. Il est présenté de façon plus détaillée dans l'ANNEXE I.

Novick (1992) considère que la perte de charge du filtre résulte de deux contributions :

- la perte de charge du filtre vierge  $\Delta P_0$ ,
- la perte de charge du gâteau de particules  $\Delta P_G$ .

Ce modèle suppose que la perte de charge due aux particules pénétrant à l'intérieur du filtre est négligeable. De plus, l'auteur considère que la compacité du dépôt qui se forme est constante et indépendante de l'épaisseur du gâteau. Ainsi la perte de charge du filtre s'écrit :

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_G \quad (1-40)$$

La perte de charge à travers le gâteau de particules provient de la force de traînée agissant sur chaque particule individuelle composant le gâteau, ainsi que d'un facteur tenant compte du fait que les particules sont en contact avec leurs voisines.

Ainsi, la perte de charge d'un filtre THE durant son colmatage par un aérosol solide s'exprime sous la forme :

$$\Delta P = K_1 \cdot \mu \cdot U_f + K_2 \cdot \frac{m_s \cdot U_f}{S_f} \quad (1-41)$$

avec  $K_2$  la résistance spécifique du gâteau de particules et  $m_s$  la masse de particules déposées sur le filtre ; la viscosité dynamique de l'effluent filtré, assimilé à de l'air, est donc intégrée dans  $K_2$ .

#### Aérosol monodispersé sphérique

Dans le cas où l'aérosol est monodispersé et sphérique, la résistance spécifique du gâteau de particules formé s'écrit :

$$K_{2\_mono} = \frac{36\mu \cdot h_k \cdot \alpha_g}{(1 - \alpha_g)^3 \cdot \rho_p \cdot Cu(d_p) d_p^2} \quad (1-42)$$

avec  $h_k$  la constante de Kozeny qui est égale à 4,8 pour des sphères et à 5,0 pour des particules de formes irrégulières (Novick *et al.*, 1992).

#### Aérosol polydispersé non-sphérique suivant une loi log normale

Selon Endo *et al.* (2001), dans le cas d'un aérosol non-sphérique suivant une loi log normale, la résistance spécifique du gâteau de particules a pour expression :

$$K_{2\_poly} = \frac{36h_k \cdot \alpha_g}{(1 - \alpha_g)^3} \cdot \frac{\mu \cdot \chi}{\tilde{d}_{ev,m}^2 \cdot \rho_p \cdot Cu \cdot \exp(-3 \ln^2 \sigma_g)} \quad (1-43)$$

avec  $\tilde{d}_{ev,m}$  le diamètre équivalent en volume médian massique de l'aérosol,  $\sigma_g$  l'écart-type géométrique de la distribution et  $\chi$  le facteur de forme dynamique de l'aérosol.

#### d. Compacité du dépôt

La compacité du dépôt  $\alpha_g$  est un paramètre important dans l'étude du colmatage d'un filtre. Elle peut être déterminée :

- par analyse d'images, en faisant l'hypothèse d'une porosité homogène sur la totalité de l'épaisseur du gâteau,
- par détermination expérimentale de l'épaisseur du dépôt et avec la relation :

$$\alpha_g = \frac{m_s}{S_f \cdot \rho_p \cdot e_g} \quad (1-44)$$

avec  $e_g$  l'épaisseur du gâteau,

- grâce à l'évolution de la perte de charge du filtre en fonction de la masse surfacique de particules collectées et en appliquant le modèle de Kozeny.

Pénicot-Bauge (1998) a proposé une corrélation empirique, calculée en utilisant le modèle de Kozeny, donnant une valeur théorique de la compacité du gâteau en fonction du diamètre des particules :

$$\alpha_g = 0,58 \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{\tilde{d}_{ae,m}}{0,53}\right) \right) \quad (1-45)$$

avec  $\tilde{d}_{ae,m}$  le diamètre aérodynamique médian massique de l'aérosol exprimé en  $\mu\text{m}$ .

Ainsi, la compacité du dépôt de particules augmente avec la taille des particules pour tendre vers une valeur proche de 0,6 correspondant à la valeur idéale d'un empilement de sphères. Pénicot-Bauge (1998) explique ce résultat par le fait que plus les particules sont grosses, plus elles ont tendance à former un empilement (au détriment de la formation de dendrites), ce qui diminue la fraction de vide entre les particules et augmente ainsi la compacité du dépôt. Selon Thomas (2001), l'emploi de cette relation est justifié pour les particules submicroniques, où la vitesse de filtration n'influe pas ou peu sur la collecte des particules, mais elle est plus délicate pour les particules microniques.

### e. Modélisation de l'ensemble du colmatage

Un code de calcul (FILDYN) donnant la perte de charge d'un filtre plan colmaté en profondeur par un aérosol submicronique a été développé au cours de la thèse de Pénicot-Bauge (1998). Pour tenir compte de la filtration en surface, il a été amélioré en intégrant le point de transition et la compacité du dépôt à la surface du filtre par Thomas (2001).

Dans ce modèle, le filtre est décomposé en tranches dans lesquelles coexistent deux sortes de collecteurs : les fibres et les particules collectées. A chaque incrément de temps et pour chaque tranche, la masse de particules collectées par les particules déjà déposées et les fibres est calculée, ainsi que la perte de charge par la relation de Bergman *et al.* (1978). Lorsque la compacité des particules atteint la valeur de la compacité de transition, une partie des particules collectées se dépose à la surface du filtre pour former un gâteau. Ce dernier participe à la collecte des particules augmentant ainsi l'efficacité de collecte du filtre. La perte de charge du gâteau est évaluée par le modèle de Novick (1992).

Ce code de calcul fait intervenir les caractéristiques du filtre (compacité, diamètre moyen des fibres, épaisseur), les caractéristiques de l'aérosol (diamètre moyen, écart-type, masse volumique) et les conditions opératoires (vitesse de filtration).

L'efficacité est déterminée à partir du modèle de Lee et Liu (1982) fondé sur les mécanismes de collecte par diffusion et interception. Ce modèle a tendance à surestimer l'efficacité et n'est donc pas satisfaisant (Thomas, 2001).

#### II.3.2. Filtre plissé : modèle de Del Fabbro

Le seul modèle recensé dans la littérature permettant de déterminer l'évolution de la perte de charge d'un filtre à petits plis pendant son colmatage par un aérosol solide est celui de Del Fabbro (2001). Ce modèle est adaptable aux filtres plissés THE et ME mais nécessite de nombreuses données d'entrée.

La démarche de Del Fabbro (2001) consiste à utiliser la loi établie pour les filtres vierges, déduite d'une approche adimensionnelle. Il est nécessaire de remplacer dans cette loi, la résistance aéraulique du medium filtrant vierge  $R$  par la résistance aéraulique du medium filtrant plan colmaté, dont la valeur peut être déduite des données expérimentales ou d'un modèle qualifié.

L'introduction de la seule résistance aéraulique du filtre plan colmaté n'étant pas suffisante, il est nécessaire d'intégrer dans le modèle, la réduction de la surface de filtration. Cette réduction inclut une modification des paramètres géométriques du filtre et un accroissement de la vitesse de filtration. La figure 1-16 illustre le dépôt des particules supposé homogène sur la hauteur de plis ; l'épaisseur du gâteau est caractérisée par la relation (1-44) :

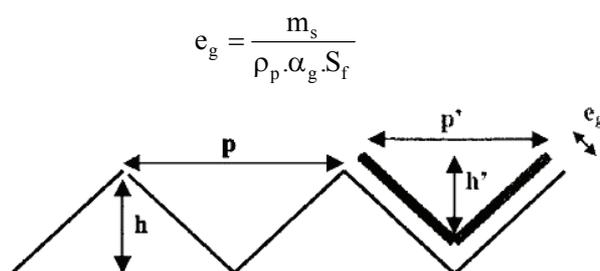


Figure 1-16: Réduction de la surface de filtration engendrée par le dépôt de particules sur le medium filtrant, le long de la hauteur d'un pli (Del Fabbro, 2001)

En supposant que le dépôt des particules est homogène, il est alors possible d'introduire un terme de réduction de surface directement corrélé au plissage du medium filtrant, en modifiant les paramètres  $h$  et  $p$  par :

$$h \rightarrow h' = h \cdot \left(1 - \frac{2e_g}{p}\right) \quad \text{et} \quad p \rightarrow p' = p - 2e_g \quad (1-46)$$

Un accroissement de la vitesse de filtration, calculé à partir de la conservation du débit d'air, est de plus pris en compte dans le modèle tel que :

$$U_{f_0} \cdot S_{f_0} = U_f \cdot S_f \quad (1-47)$$

avec  $U_{f_0}$  et  $S_{f_0}$  la vitesse et la surface de filtration en début de colmatage, lorsque le filtre est vierge.

L'ensemble de ces considérations a permis à Del Fabbro (2001) de proposer le modèle suivant :

$$\frac{\Delta P}{Z.R.U_{f_0}} = \left(1 + \frac{h.Z}{p^2}\right)^{460} \left(\frac{\mu}{Z^2.R}\right)^{0,7} \cdot 10^{\frac{0,7 \cdot \left(\frac{\mu}{Z^2.R}\right)^{0,7} \left(\frac{h}{p}\right)^2}{\log\left(1 + \frac{h}{Z.Re_f}\right)}} \cdot \left(1 - \frac{2m_s}{p \cdot \alpha_g \cdot \rho_p \cdot S_f}\right)^{-\frac{15}{Re_f}} \quad (1-48)$$

La compacité du gâteau est calculée à partir de la corrélation de Pénicot-Bauge (1998). Dans l'équation, les paramètres géométriques  $h$  et  $p$  ainsi que la résistance aéraulique du medium filtrant sont des fonctions de l'évolution du colmatage.

Les résultats obtenus avec ce modèle sont en bon accord avec les résultats expérimentaux issus de colmatage avec des particules microniques, i. e. lorsque le dépôt de particules tend vers un dépôt homogène (faible vitesse de filtration). Néanmoins, la complexité du modèle développé et notamment la nécessité de renseigner la résistance aéraulique du medium filtrant tout au long du colmatage, rend son utilisation difficile.

### Bilan

*La filtration d'aérosols solides sur filtres plissés se complexifie par rapport à la filtration sur filtres plans par l'apparition d'une phase de réduction de la surface utile de filtration, entraînant une augmentation exponentielle de la perte de charge du filtre. Le diamètre des particules est un paramètre fondamental, quel que soit le type de filtre THE (plan ou plissé), qui influe sur l'évolution de la perte de charge du filtre ; la vitesse de filtration étant un paramètre supplémentaire d'influence dans le cas des filtres plissés.*

*Pour modéliser le colmatage de filtres plissés, il est donc nécessaire de prendre en compte cette réduction de surface. A ce jour, seul le modèle de Del Fabbro (2001), établi pour des filtres THE et ME et testé pour des aérosols microniques, le permet. Néanmoins, son emploi est difficile car il nécessite comme donnée d'entrée l'évolution de la résistance aéraulique du medium filtrant tout au long du colmatage. D'autres approches ont été suggérées, telles que l'utilisation du modèle de Kozeny accompagné d'une expression géométrique de l'évolution de l'épaisseur du dépôt durant le colmatage (Laborde et al., 2002) ou encore d'un terme global de réduction de la surface de filtration (Bouilloux et al., 2003), mais elles souffrent encore d'un manque de qualification. Cela montre bien la complexité de modéliser le colmatage d'un filtre plissé. Ces études répondent pourtant à un réel besoin, puisque tous les filtres THE industriels sont plissés.*

*La prochaine partie de ce chapitre porte sur la filtration d'aérosols liquides.*

## III. FILTRATION D'AEROSOLS LIQUIDES

La filtration d'aérosols liquides, le plus souvent étudiée sur des media plans, est complexe car elle met en jeu des phénomènes de réarrangement et de drainage du liquide. Cette partie comprend l'étude du comportement général d'un aérosol liquide filtré et son interaction avec les fibres constituant le medium, ainsi que l'étude de l'évolution de la perte de charge et de l'efficacité du filtre durant le colmatage. L'influence de divers paramètres sur le colmatage est également présentée. Enfin, une synthèse des modèles de perte de charge et d'efficacité existant dans la littérature est proposée, ainsi que la présentation d'une étude relative à un mélange d'aérosols solide et liquide.

### III.1. Comportement d'un aérosol liquide filtré

#### III.1.1. Comportement général

Raynor et Leith (2000) décrivent le comportement général d'un aérosol liquide filtré (Cf. figure 1-17) :

- en amont du filtre, une partie des gouttelettes s'évapore et passe à travers le filtre sans rencontrer d'obstacle. Ce taux d'évaporation dépend de la température ambiante, de la composition chimique de l'aérosol, de sa tension de vapeur, de sa granulométrie et du degré de saturation de l'air en vapeur ;
- une partie des gouttelettes passe à travers le filtre sous forme liquide, sans être collectées. La proportion de gouttes non collectées dépend de la qualité du medium, donc plus l'efficacité du medium est grande, moins cette proportion est grande ;
- une partie des gouttelettes collectées par le filtre peut être réentraînée par le flux d'air. Ce phénomène semble d'autant plus important que la vitesse de filtration est grande ;
- selon la volatilité de l'aérosol, la température et la saturation de l'air, le liquide filtré peut également s'évaporer ;
- enfin, une grande partie du liquide piégé par le filtre draine vers le bas du medium. Une partie du liquide reste même emprisonnée dans le medium filtrant indéfiniment par les forces de capillarité.

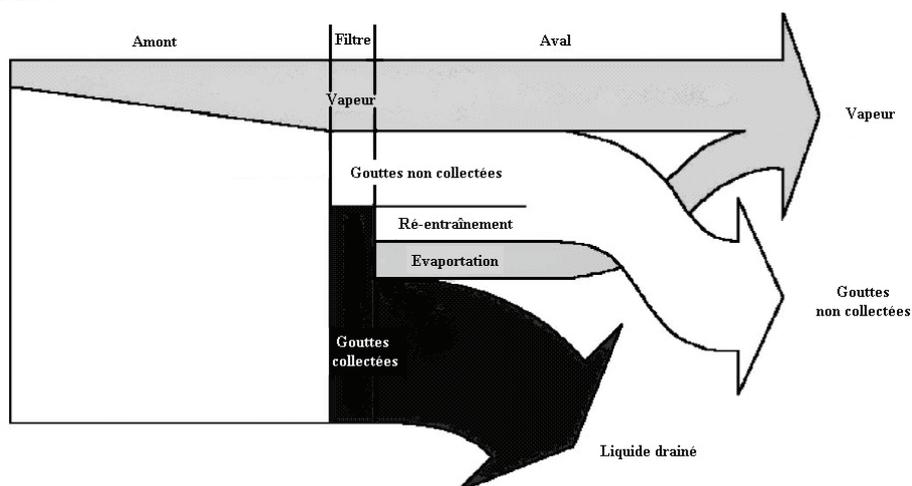


Figure 1-17 : Comportement schématique d'un aérosol liquide filtré (Raynor et Leith, 2000)

#### III.1.2. Interaction goutte-fibre

Liew et Conder (1985) considèrent que le dépôt peut se présenter sous deux aspects différents, visualisés sur la figure 1-18, selon la compacité du medium filtrant :

- pour un medium de faible compacité ( $\alpha < 0,004$ ) les interstices entre les fibres sont considérés comme trop grands pour qu'ils soient remplis par le liquide. Ainsi, le dépôt se fait sous forme de gouttes situées aux intersections des fibres. Hormis ces zones d'intersection, les fibres sont donc peu recouvertes par le liquide ;
- pour un medium de plus grande compacité ( $\alpha \geq 0,1$ ), l'espace entre les fibres et au niveau des points d'intersection entre les fibres est du même ordre de grandeur que la taille des particules, les gouttelettes indépendantes n'existent plus. Le dépôt se présente alors sous forme de petites flaques s'étendant sur plusieurs fibres, de film ou de ponts liquides entre plusieurs fibres (selon le caractère mouillant du liquide).

Pour les filtres de compacité intermédiaire, le dépôt est donc une combinaison des deux approches proposées.

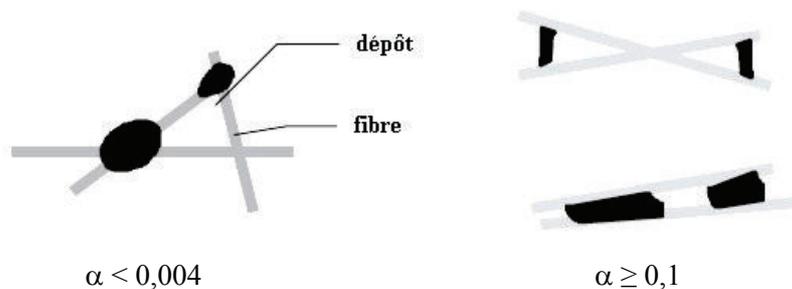


Figure 1-18 : Les différents aspects du dépôt d'un aérosol liquide sur les fibres selon la compacité du medium (Pénicot-Bauge, 1998)

Le caractère mouillant de l'aérosol est également un paramètre important à considérer en présence d'un système liquide-solide (aérosol-fibre). De façon générale, lorsqu'un liquide est mis en contact avec la surface d'un solide, il se forme un angle de raccordement du premier sur le second comme le montre la figure 1-19. Un liquide mouillera facilement un solide si ce dernier possède une énergie de surface plus élevée que celle du liquide. En effet, l'adhésion du liquide à la surface du solide sera alors supérieure à la cohésion du liquide. Lorsque le mouillage est parfait, l'angle de raccordement  $\theta$  devient nul. Dans ce cas l'énergie d'adhésion est maximale. Le mouillage dépend de la pression, de la température ou encore de l'hygrométrie.

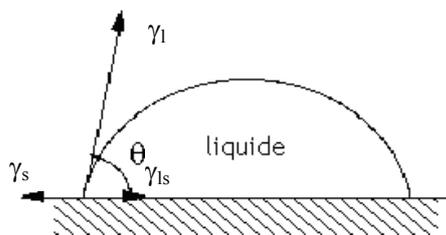


Figure 1-19 : Schématisation de l'étalement d'une goutte

avec  $\gamma_l$  la tension superficielle du liquide,  $\gamma_s$  la tension superficielle du solide et  $\gamma_{ls}$  la tension interfaciale liquide-solide.

Fairs (1958), cité par Pénicot-Bauge (1998), distingue plusieurs types de dépôt selon le caractère mouillant de l'aérosol :

- lorsque la fibre n'est pas complètement mouillée par l'aérosol, le dépôt se fait sous forme de gouttelettes dont l'angle de contact dépend du prétraitement éventuel subi par la surface des fibres,
- lorsque la fibre est complètement mouillée par le liquide, celui-ci forme un film uniforme autour de la fibre qui voit son diamètre ainsi augmenter.

Fairs (1958) constate que l'efficacité du filtre est supérieure lorsque le dépôt est sous forme de gouttelettes comparée à un dépôt sous forme d'un film. En d'autres termes, un aérosol avec un caractère mouillant peu prononcé conduit à une plus grande efficacité selon Fairs (1958). Liew et Conder (1985) expliquent que la surface totale disponible (fibres vierges et gouttelettes liquides attachées aux fibres) est supérieure lorsque le dépôt est sous forme de gouttelettes ainsi, l'efficacité de capture est plus grande.

### III.2. Evolution des performances d'un filtre

Les évolutions de la perte de charge et de l'efficacité d'un filtre THE au cours de son colmatage par un aérosol liquide sont représentées sur la figure 1-20. Une première description de l'évolution de la perte de charge a été proposée par Walsh *et al.* (1996), confirmée par Charvet (2008) avec un filtre à fibres en cellulose en position horizontale.

Grâce à des observations au microscope électronique à balayage, une description phénoménologique en quatre stades de la perte de charge et de la perméance a été proposée par Contal *et al.* (2004) :

- au début du colmatage, les gouttelettes se déposent sous forme de perles à la surface des fibres. Ce dépôt entraîne deux conséquences :
  - une augmentation de la perte de charge due à l'augmentation de la surface de frottement,
  - une augmentation exponentielle de la perméance liée à une diminution de la surface effective de collecte des fibres.
- le début du stade 2 est caractérisé par un point d'inflexion sur la courbe de perte de charge, ce qui signifie en d'autres termes que l'augmentation de la perte de charge est moins importante au stade 2 qu'au stade 1. Ce point d'inflexion est plus ou moins prononcé selon les filtres et les conditions opératoires. Trois explications ont été proposées pour expliquer ce phénomène :
  - la coalescence des gouttelettes,
  - le mouillage des fibres par le liquide,
  - la redistribution du liquide collecté à l'intérieur du filtre.

Selon Contal *et al.* (2004), il s'agit vraisemblablement d'une combinaison des trois effets ;

- le troisième stade se caractérise par la formation de ponts liquides entre les fibres ou de films liquides aux interstices des fibres. Cela entraîne une augmentation importante de la résistance à l'écoulement, traduite par une augmentation exponentielle de la perte de charge. La surface de passage pour le gaz diminue, ce qui conduit à une augmentation de la vitesse interstitielle et donc à une baisse de la perméance en favorisant le mécanisme d'impaction. L'augmentation de l'efficacité n'est valable que si l'impaction est le phénomène de collecte prépondérant, soit pour des particules de grande taille. En effet, pour des particules collectées par diffusion, le phénomène inverse devrait en toute vraisemblance être observé ;
- en fin de colmatage, la plupart des interstices sont remplis de liquide et un film liquide se forme à la surface du filtre. La collecte de liquide et le drainage s'équilibrent afin de former un état pseudo-stationnaire où perte de charge et perméance sont constantes.

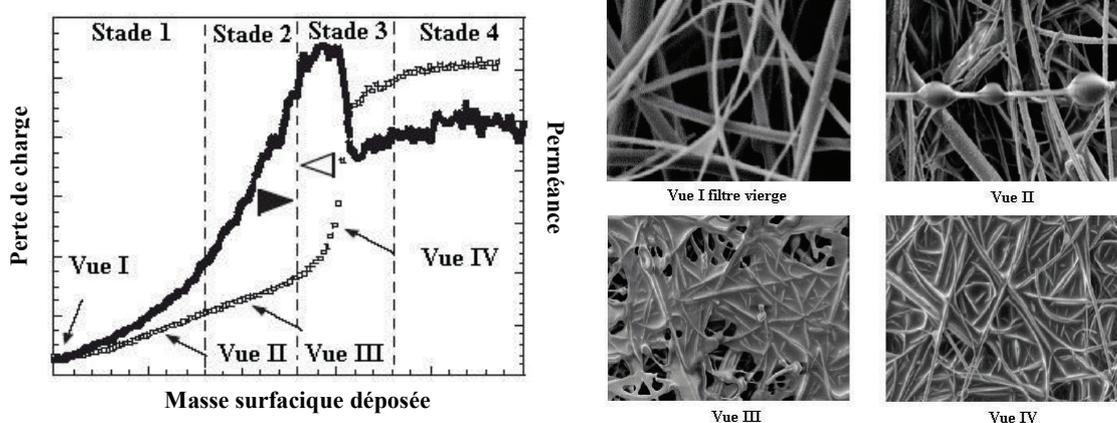


Figure 1-20 : Evolutions de la perméance et de la perte de charge d'un filtre THE plan au cours de son colmatage par un aérosol liquide (Contal *et al.*, 2004)

### III.3. Influence de divers paramètres

#### III.3.1. Influence de la vitesse de filtration

Frising (2004) a étudié l'influence de la vitesse de filtration sur le colmatage de filtres HE (Haute Efficacité), présentant des évolutions de perméance et de perte de charge identiques aux filtres THE. L'aérosol utilisé pour colmater les filtres est du DEHS de  $0,18 \mu\text{m}$  de diamètre et trois vitesses de filtration ont été étudiées :  $5,7 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $15,4 \text{ cm.s}^{-1}$  et  $25 \text{ cm.s}^{-1}$ . Les résultats de Frising (2004) ont montré que les valeurs finales de perméance et de perte de charge du filtre sont d'autant plus faibles que la vitesse de filtration est grande.

Ainsi, il est plus intéressant de travailler à vitesse de filtration élevée en filtration d'aérosol liquide, contrairement au cas de la filtration d'aérosol solide.

### III.3.2. Influence de la concentration en aérosol

Contal *et al.* (2004) ont étudié l'influence de la concentration en aérosol de DOP de 0,6  $\mu\text{m}$  de diamètre sur le colmatage d'un filtre de type Whatman (THE). La gamme de concentration s'étend de 0,6  $\text{g.Nm}^{-3}$  à 5,7  $\text{g.Nm}^{-3}$  pour une vitesse de filtration de 5,9  $\text{cm.s}^{-1}$ . Les résultats montrent que la concentration en DOP n'a pas d'influence sur la résistance à l'écoulement du filtre. Cette conclusion ne peut pas être étendue à une plus large gamme de concentration ou même à tous les aérosols, mais confirme néanmoins les résultats obtenus avec des aérosols solides.

### III.3.3. Influence de la nature du filtre

Frising (2004) montre que différents filtres, constitués tous de fibres de verre mais de classes d'efficacité différentes, présentent des évolutions totalement opposées de leur perméance au cours du temps. En effet, la perméance d'un filtre ME diminue au cours du colmatage contrairement à celle d'un filtre HE ou THE.

En ne considérant que des filtres THE, les caractéristiques propres à chaque filtre influent fortement sur l'évolution du colmatage. Le diamètre moyen des fibres est le plus souvent le paramètre utilisé pour différencier les filtres entre eux. Contal *et al.* (2004) montrent qu'à vitesse de filtration donnée et pour une même masse surfacique d'aérosol collecté, la résistance aérodynamique du filtre est d'autant plus grande que le diamètre des fibres est faible.

### III.3.4. Influence de la nature de l'aérosol : tension superficielle et viscosité dynamique

Pénicot-Bauge (1998) a étudié l'influence de la tension superficielle sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre THE plan pour trois aérosols de granulométrie comparable ( $d_p \cong 0,6 \mu\text{m}$ ), mais de tension superficielle et de viscosité dynamique différentes : glycérol, DMP (DiMéthyle Phtalate) et DOP.

Le colmatage du filtre est beaucoup plus rapide pour le glycérol que pour les deux autres aérosols. Thomas (2001) explique que la viscosité du glycérol est 1000 fois plus grande que celle du DMP ou du DOP ce qui doit ainsi limiter le réarrangement au sein du gâteau. Selon Pénicot-Bauge (1998), le dépôt du glycérol, qui est un aérosol majoritairement sphérique, offre une surface spécifique supérieure à celle du DOP. En ce qui concerne les aérosols de DMP et de DOP, l'évolution de la perte de charge montre que le DMP a un point de transition plus rapide que le DOP mais les valeurs de tension superficielle ne permettent pas de l'expliquer.

Concernant l'influence de ces deux paramètres sur l'efficacité, Frising (2004) a diminué artificiellement la tension superficielle d'un aérosol de glycérol et de DEHS en ajoutant du tensioactif, ce qui a eu pour effet d'augmenter la viscosité dynamique. L'auteur a ainsi observé que l'ajout de tensioactif provoque une diminution de l'efficacité moyenne du filtre au cours de la filtration et, pour le cas du glycérol, une augmentation drastique de la perméance après l'augmentation brusque de la perte de charge.

Il s'avère difficile de distinguer l'influence de la tension superficielle de celle de la viscosité dynamique puisque ces deux paramètres demeurent intimement liés. Le caractère mouillant du liquide, favorisé par une faible viscosité et une faible tension superficielle, semble être un paramètre intéressant à considérer pour décrire l'influence de la nature de l'aérosol sur l'évolution de la perte de charge et de la perméance du filtre.

De la même manière, la mouillabilité des fibres constituant le médium filtrant a son importance : sur une surface hydrophile, une goutte d'eau peut s'étendre facilement et par conséquent, la surface de contact devient maximale et l'angle de contact minimal.

### III.3.5. Cas d'un mélange solide-liquide

Frising (2004) a étudié le colmatage d'un filtre THE plan par un mélange d'aérosols solides et liquides. Les aérosols ont été choisis de manière à ce qu'il y ait le moins d'interactions. Ainsi, l'auteur utilise du DEHS (huile organique, submicronique) et de l'alumine (minéral, micronique). Des observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB) des filtres ont permis de mettre en évidence différentes étapes de colmatage, dont une étape finale de drainage, et également de souligner l'influence de la proportion de solide dans le mélange.

## III.4. Modélisation

### III.4.1. Perte de charge

Il existe peu d'études concernant la modélisation de l'évolution de la perte de charge d'un filtre THE, et plus généralement d'un medium fibreux, au cours de son colmatage par un aérosol liquide. Liew et Conder (1985) ont simplement établi une corrélation donnant la perte de charge du filtre en régime permanent :

$$\Delta P = \Delta P_0 \left[ 1,09 \left( \alpha \cdot \frac{Z}{d_f} \right)^{-0,561} \left( \frac{U_f \cdot \mu_l}{\gamma_l \cdot \cos \theta} \right) \right] \quad (1-49)$$

avec  $\theta$  l'angle de contact goutte-fibre.

Cette corrélation a été établie pour des media filtrants de compacité comprise entre 0,076 et 0,142 et des diamètres de fibres compris entre 4 et 22  $\mu\text{m}$ .

Pénicot-Bauge (1998) propose d'utiliser un modèle simpliste, développé par Davies, qui repose sur l'augmentation du diamètre des fibres et de la compacité liée aux gouttelettes collectées. Ce modèle suppose que le liquide est mouillant et uniformément réparti au sein du filtre. La perte de charge est donnée par l'expression de Davies (1973) (Cf. relation (1-10)), dans laquelle le diamètre des fibres est remplacé par le diamètre des fibres mouillées ( $d_{f_{mo}}$ ) :

$$d_{f_{mo}} = d_f \sqrt{1 + \frac{m_l}{S_f \cdot \rho_l \cdot Z \cdot \alpha}} \quad (1-50)$$

et la compacité par  $\alpha_{mo}$  :

$$\alpha_{mo} = \alpha + \frac{1}{\rho_l \cdot Z} \cdot \frac{m_l}{S_f} \quad (1-51)$$

avec  $m_l$  la masse de liquide collecté sur le filtre.

Selon Pénicot-Bauge (1998), ce modèle rend compte de façon satisfaisante de l'évolution générale de la perte de charge en début de colmatage.

### III.4.2. Perméance du filtre

Thomas (2001) recense trois modèles permettant de décrire l'évolution de la perméance d'un filtre THE durant son colmatage par un aérosol liquide. Ces modèles supposent tous que le liquide est uniformément réparti au sein du medium filtrant :

- Payet (1991) considère que la formation de ponts liquides, entre les fibres et aux intersections, induit une diminution de la surface efficace de collecte ;
- Gougeon (1994) tente d'expliquer l'augmentation de la perméance, non pas par la diminution de la compacité, mais par l'augmentation du diamètre des fibres. Thomas (2001) précise qu'il est surprenant que l'auteur ne tienne pas compte de l'accroissement de la compacité du filtre lié au grossissement artificiel des fibres ;
- Raynor (2000) suppose, comme Payet (1991), que la fraction de la fibre recouverte par le liquide a une efficacité nulle. L'auteur présume que le liquide collecté par les fibres se présente sous forme d'un chapelet de gouttes et estime ainsi la fraction de fibre non recouverte par le liquide.

Thomas (2001) montre que le modèle de Payet (1991) traduit bien l'évolution expérimentale de la perméance en début de colmatage et celui de Raynor (2000), qui passe par un optimum, pourrait traduire l'évolution en fin de colmatage. Ainsi, un modèle couplant ces deux approches et tenant compte du profil de pénétration devrait donner des résultats encourageants.

### III.4.3. Modèle phénoménologique de la perte de charge et de la perméance

Frising (2004) propose un modèle phénoménologique traduisant les évolutions de la perte de charge et de la perméance d'un filtre durant son colmatage avec un aérosol liquide. Ce modèle, qui tient compte des modifications du diamètre des fibres et de la compacité du medium, nécessite de faire les hypothèses suivantes :

- le filtre est homogène et isotrope,
- le diamètre des fibres, supposé identique pour chaque fibre, est assimilé au diamètre moyen,
- le liquide est un fluide mouillant les fibres.

Le filtre est divisé en tranches appelées pelures. Dans une tranche de filtre, les gouttelettes collectées en début de colmatage par les fibres modifient l'aérodynamique. La collecte des gouttelettes sur les fibres est supposée avoir la même incidence qu'une augmentation du diamètre des fibres. Ainsi, d'un point de vue phénoménologique, le diamètre des fibres augmente jusqu'à une valeur limite correspondant à une compacité de liquide limite appelée  $\alpha_{\text{gaine}}$ .

Après cette première étape, tout liquide collecté forme des ponts liquides entre les fibres, entraînant une diminution de la surface de collecte. Une partie du liquide collecté dans une tranche du filtre est transférée par capillarité vers la tranche voisine, située en aval de la première. Le diamètre de la « gaine liquide » autour des fibres reste constant. La compacité du liquide, dans cette tranche, augmente jusqu'à une valeur limite  $\alpha_{\text{film}}$ , liée à l'apparition d'un film liquide entre les fibres qui obstrue une grande partie de la tranche du filtre.

Durant la troisième étape, la compacité est constante et maximale dans la tranche du filtre considérée. Le liquide collecté pendant cette phase est supposé migrer sous l'action des forces capillaires ou celles liées à l'écoulement vers la tranche suivante. La perméance et la perte de charge restent constantes.

Lorsque la totalité du filtre est saturée en liquide (i.e. toutes les tranches ont atteint  $\alpha_{\text{film}}$  la compacité maximale du liquide), le liquide collecté est drainé vers l'extérieur du filtre.

Ce modèle nécessite d'imposer un modèle d'efficacité issu de la littérature. Frising (2004) utilise le modèle Liu-Rubow-Gougeon et optimise trois paramètres : le diamètre maximal de la gaine de liquide, le pas de masse ( $\text{g.m}^{-2}$ ) et le nombre de pelures.

### Bilan

*La filtration d'aérosols liquides sur media filtrants plans conduit, en fin de filtration, à une stabilisation des valeurs de perte de charge et d'efficacité, grâce à un équilibre entre le drainage et la collecte des particules. Il est vraisemblable que cet état pseudo-stationnaire se retrouve également avec des filtres plissés. Cette synthèse a montré que la filtration d'aérosols liquides, contrairement aux aérosols solides, conduit à une plus faible perte de charge et à une plus grande efficacité du filtre avec une forte vitesse de filtration ; une influence de la nature de l'aérosol au travers de sa viscosité dynamique et de sa tension superficielle a également été mise en évidence.*

*Avant d'étudier l'influence de l'humidité sur le colmatage des filtres THE, la partie suivante introduit la notion d'interaction entre l'humidité de l'air et, d'une part les fibres du medium, d'autre part les particules qui colmatent le filtre.*

## IV. ETUDE DE L'AIR HUMIDE ET DE SES INTERACTIONS

Les paramètres hygrométriques de l'air sont tout d'abord abordés, suivis des interactions qui existent entre l'air humide et le filtre et entre l'air humide et les particules qui colmatent le filtre.

### IV.1. Paramètres hygrométriques

Pour une température et une pression données, il existe une quantité maximale de vapeur d'eau que l'atmosphère peut accepter sans que n'apparaisse une condensation sous forme liquide ou solide.

La norme NF X 15 – 110 définit les paramètres hygrométriques. Les deux paramètres principaux sont l'humidité relative et le rapport de mélange.

#### IV.1.1. Humidité relative

L'Humidité Relative (HR) par rapport à l'eau liquide est le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air  $P_i$ , sur la pression de vapeur saturante  $P_s$  pour une température et une pression données :

$$HR = \frac{P_i}{P_s} \cdot 100 \quad (1-52)$$

Pour une quantité d'eau présente dans un volume d'air, l'humidité relative correspondante dépend de la pression atmosphérique totale et de la température de l'air. La valeur d'humidité relative caractérise l'éloignement de l'air au point d'équilibre thermodynamique entre la phase vapeur et la phase liquide ou glace (saturation). Si la vapeur d'eau est en équilibre avec la glace, l'humidité est alors définie par rapport à la pression de vapeur saturante au-dessus de la glace.

#### IV.1.2. Rapport de mélange

Le rapport de mélange  $r$  est défini comme le rapport de la masse de vapeur d'eau  $m_v$  contenue dans un volume d'air humide, sur la masse d'air sec  $m_{as}$  contenue dans ce même volume. Le rapport de mélange est indépendant de la température du milieu :

$$r = \frac{m_v}{m_{as}} \quad (1-53)$$

#### IV.1.3. Influence de l'humidité sur les propriétés physiques de l'air

Tsilingiris (2008) a étudié l'influence de la température et de l'humidité sur la viscosité dynamique et la masse volumique de l'air. La figure 1–21 présente les résultats d'évolution de ces deux paramètres en fonction de la température entre 0 et 100 °C et de l'humidité relative entre 0 et 100 %. Ces abaques ont été déterminés à partir de considérations théoriques et de corrélations empiriques et ont ensuite été confrontés à des résultats expérimentaux issus de la littérature. Il apparaît que la viscosité dynamique et la masse volumique de l'air évoluent très peu à 25 °C, en fonction de l'humidité relative.

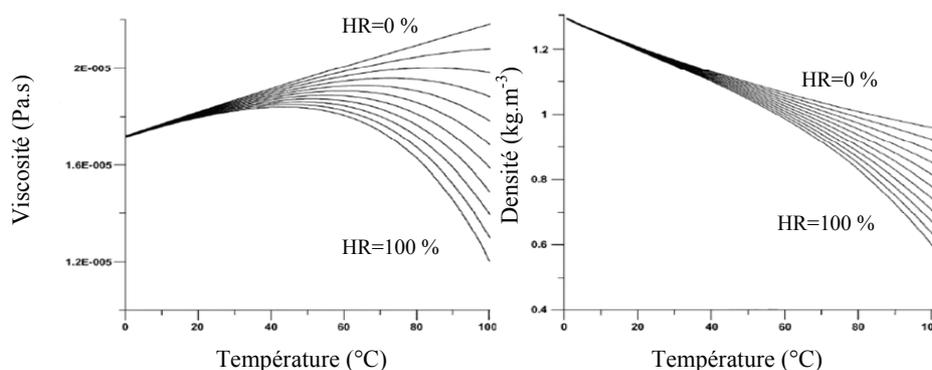


Figure 1–21 : Evolution de la viscosité dynamique et de la masse volumique de l'air en fonction de la température et de l'humidité relative (Tsilingiris, 2008)

## IV.2. Interactions entre l'air humide et le medium filtrant

### IV.2.1. Mécanismes d'incorporation de l'eau dans le medium

L'incorporation de l'eau dans le medium filtrant peut se faire par trois mécanismes, selon la quantité d'eau contenue dans l'air :

- par sorption,
- par condensation,
- par filtration des gouttelettes d'eau.

#### a. La sorption

Le terme sorption regroupe les mécanismes d'adsorption (*Cf.* ANNEXE II), d'absorption et de condensation capillaire. Selon Tierney, cité par Laborde (2000), les mécanismes d'adsorption chimique et d'absorption sont négligeables pour un filtre non colmaté. Jusqu'à une humidité relative de 65 %, seule l'adsorption physique d'eau sur les fibres est susceptible d'être prépondérante. Pour une humidité relative comprise entre 65 et 100 %, la condensation capillaire devient majoritaire.

En ce qui concerne les filtres initialement colmatés, le transfert par adsorption chimique et par absorption peut intervenir selon la nature de l'aérosol initialement déposé sur le filtre. De manière générale, il convient de dire que le colmatage d'un filtre, pour une humidité relative donnée, provoque une augmentation de la quantité d'eau transférée par adsorption de la vapeur d'eau sur l'aérosol déposé sur le medium.

#### b. La condensation

Le transfert d'eau par condensation sur les fibres se produit lorsque la température de rosée de l'air humide est supérieure à la température des fibres, ou lorsque l'humidité relative atteint 100 %. Une partie de l'eau condensée est retenue au sein du medium filtrant, l'autre étant principalement évacuée par gravité.

#### c. La filtration liquide

Lorsque la concentration d'eau présente dans l'air conduit à une masse d'eau supérieure à celle correspondant à une humidité relative de 100 %, le filtre peut être soumis à des gouttelettes formant des aérosols liquides. La filtration liquide en air saturé est alors principalement caractérisée par le diamètre des gouttelettes et la concentration en aérosol liquide.

### IV.2.2. Isothermes d'adsorption de media THE

Ricketts *et al.* (1987) ont étudié les isothermes d'adsorption de media THE en fibres de verre à une température de 25 °C entre 32 et 97 % d'humidité relative par une méthode gravimétrique. Les résultats révèlent que la masse d'eau retenue par masse de medium sec est de l'ordre de 1 % jusqu'à 60 % d'humidité relative, puis augmente jusqu'à 10 % à 97 % d'humidité relative.

Brown *et al.* (2006) ont étudié les variations de masse de media à base de fibres de verre, utilisés pour le prélèvement des particules en suspension dans l'air dans le cadre du contrôle de la pollution atmosphérique, dues au stockage des filtres en présence d'humidité. Les résultats indiquent de faibles variations en masse des media, de l'ordre de 1 % lorsqu'ils sont exposés entre 48 et 72 h, à des taux d'humidité relative compris entre 30 et 80 %. La présence ou non de liants dans le medium ne semble pas influencer la prise en masse d'eau.

Les isothermes de sorption du medium filtrant utilisé dans le cadre de ces travaux, et des cordelettes utilisées pour assurer le maintien des plis les uns par rapport aux autres, ont été réalisées par le Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (Callé-Chazelet *et al.*, 2008 b). Les mesures ont été effectuées à l'aide d'une balance de sorption. Les résultats pour le medium filtrant indiquent que la prise en masse de l'échantillon reste très faible, inférieure à 1,4 % sur toute la gamme d'humidité relative étudiée de 0 à 80 % ; le transfert de masse vers les fibres de verre qui constituent le medium filtrant est donc négligeable.

Il est important de préciser que ce type de medium filtrant subit un traitement hydrofuge limitant le transfert de masse. Pour les cordelettes, les résultats indiquent que la prise en masse de l'échantillon reste également négligeable, puisqu'elle est inférieure à 0,3 %, sur la gamme d'humidité relative étudiée comprise entre 0 et 80 %.

Les résultats de Nishioka (1990) révèlent que l'adsorption d'eau par un medium à base de fibres de verre est d'autant plus importante que le taux d'humidité est grand. Pour les faibles taux d'humidité relative testés compris entre 0,5 et 8 %, les résultats de Nishioka (1990) indiquent que la relation entre la quantité d'eau adsorbée et l'humidité relative est linéaire. Pour un taux d'humidité relative de 8 %, le medium testé adsorbe 800 µg d'eau par g de medium.

### IV.3. Interactions entre l'air humide et l'aérosol

Pour étudier la filtration d'aérosols en présence d'humidité, il est important de s'intéresser à leurs interactions avec l'air humide. En effet, dans le cas d'un aérosol initialement solide, les particules peuvent faire office de noyaux de condensation et donner naissance à des gouttelettes ; la filtration devient alors, en partie ou totalement, une filtration liquide.

#### IV.3.1. Théorie de la formation d'une goutte

La formation d'une gouttelette dans l'air humide par condensation, i.e. par transition de vapeur en liquide, s'opère sur une surface dont la pression de vapeur saturante est plus faible que la pression de vapeur dans l'air. La vapeur se condense soit à la surface de noyaux de condensation déjà présents dans le gaz, par le phénomène de nucléation hétérogène, soit spontanément en formant des embryons (agrégats de molécules de liquide), par le phénomène appelé nucléation homogène.

En réalité, la formation d'une gouttelette dans un air humide nécessite la présence de particules, puisque dans le cas d'un air très pur, seul un taux de saturation très élevé peut permettre la formation de gouttes. C'est notamment le cas pour les gouttes formant les nuages, qui ne peuvent pas se former par nucléation homogène car les saturations nécessaires sont trop élevées par rapport à celles rencontrées dans l'atmosphère.

##### a. Equilibre d'une goutte d'eau dans de l'air humide : l'effet Kelvin

La relation de Clapeyron décrit les conditions d'équilibre entre une phase liquide et une phase vapeur. Les pressions calculées sont valables pour une phase liquide plane et de surface infinie. Or, pour des gouttes de faible taille, ayant un rayon de courbure non négligeable, la barrière énergétique à franchir pour former une goutte est plus importante. La pression de vapeur saturante nécessaire à la formation de la gouttelette est supérieure à la pression de vapeur saturante des tables thermodynamiques.

Seinfeld (1986) a étudié la variation d'enthalpie libre  $\Delta G$  entre l'embryon d'une goutte et la vapeur du milieu en équilibre. Il traduit les probabilités de collisions et d'agrégaions de molécules d'eau pour former l'embryon d'une goutte stable :

$$\Delta G = G_{\text{goutte}} - G_{\text{vapeur}} \quad (1-54)$$

Le taux de saturation  $S$  est défini comme le rapport entre la pression de vapeur saturante au niveau de la goutte  $P_g$  et la pression de vapeur saturante sur une surface plane  $P_s$  :

$$S = \frac{P_g}{P_s} \quad (1-55)$$

La figure 1-22 donne la variation d'enthalpie libre du système goutte-vapeur, en fonction du rayon de la goutte en équilibre. Si le milieu est en dessous de la saturation, la fonction  $\Delta G = f(r_p)$  est monotone croissante ; ainsi la nucléation homogène ne peut pas être un processus spontané. Si le milieu est sursaturé, la courbe  $\Delta G = f(r_p)$  présente un maximum. En ce point, une goutte est en équilibre métastable avec son environnement.

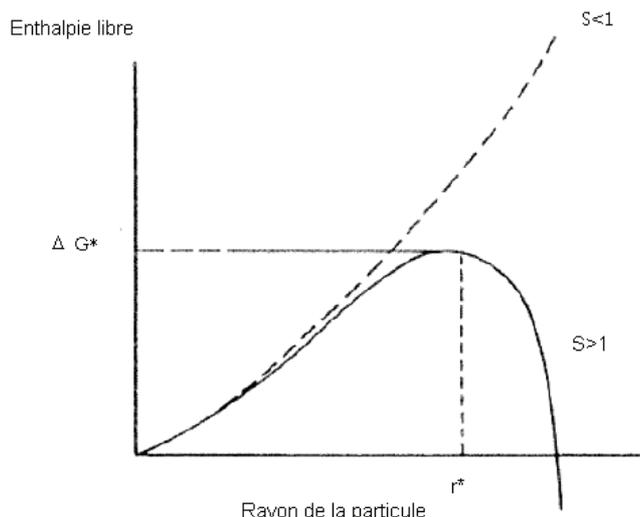


Figure 1-22 : Variation de l'enthalpie libre en fonction du rayon de la particule (Seinfeld, 1986)

Pour une valeur de saturation donnée, le rayon critique  $r^*$  peut être calculé par la relation de Kelvin :

$$S = \exp\left(\frac{2\gamma_l \cdot M_l}{\rho_l \cdot R_{GP} \cdot T \cdot r^*}\right) \quad (1-56)$$

avec  $M_l$  la masse molaire du liquide,  $R_{GP}$  la constante des gaz parfaits ( $R_{GP} = 8,3145 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) et  $r^*$  le rayon de Kelvin, i. e. le rayon critique de la particule pour lequel la gouttelette de liquide est en équilibre avec la vapeur environnante de pression  $P_g$ . Ainsi, si la pression de vapeur au voisinage de la gouttelette devient supérieure à  $P_g$ , la gouttelette va grossir par condensation ; en revanche, lorsque la pression de vapeur devient inférieure à  $P_g$ , des molécules de vapeur s'évaporent et le rayon de la gouttelette diminue. Dans le cas où la saturation est égale à 1, les deux processus de croissance et d'évaporation s'équilibrent : pour une population de gouttelettes donnée, la moitié va se condenser et l'autre s'évaporer. La goutte de rayon  $r^*$  est dite dans un état métastable. Les aérosols qui dépassent la saturation critique sont dits activés.

Pour de l'air à 293 K contenant de la vapeur d'eau, le taux de saturation en fonction du rayon de la goutte s'écrit :

$$S = \exp\left(\frac{1,07 \cdot 10^{-7}}{r^*}\right) \quad (1-57)$$

Cette équation est une approximation, en particulier pour les petits rayons, car la tension superficielle de la goutte est supposée constante ; or, celle-ci varie en fonction de son rayon : sa valeur diminue lorsque le rayon diminue également. Cette équation permet de déduire que les plus petites gouttelettes requièrent un taux de saturation supérieur à celui que demandent les plus grosses gouttelettes pour se maintenir à l'équilibre.

#### b. Nucléation homogène

Les conditions de saturation nécessaires au déclenchement du phénomène de nucléation homogène sont rarement réunies. Renoux et Boulaud (1998) expliquent que, même pour une vapeur sous-saturée, les forces d'attraction intermoléculaires permettent la formation d'agrégats moléculaires. Ces agrégats sont formés en permanence mais ils sont instables et se désintègrent continûment. En revanche, lorsque la vapeur est sursaturée, le nombre d'agrégats formés augmente de façon à permettre des collisions entre eux plus fréquentes et conduisant à des agrégats de plus grandes tailles. Ainsi, plus la saturation augmente, plus la fréquence des collisions augmente en permettant la formation d'agrégats de taille supérieure à  $r^*$ . Lorsqu'un agrégat a atteint la taille de  $r^*$ , il devient stable et peut alors grossir par condensation. La saturation requise pour que ce phénomène survienne est appelée saturation critique.

### c. Nucléation hétérogène

La formation de gouttelettes sur des particules solides est le résultat d'une accumulation de liquide condensé à leur surface. En fonction de la forme du noyau, la particule est progressivement entourée par un film liquide, puis changée en gouttelette, i. e. activée. En première approximation, les particules en suspension peuvent être considérées comme sphériques.

Dans le cas d'une nucléation hétérogène à partir d'un sel, Köhler a proposé une relation liant le taux de saturation et le rayon d'une goutte :

$$\ln(S) = \frac{a}{r_g} - \frac{b}{r_g^3} \quad (1-58)$$

a et b sont des constantes caractéristiques de la nature de la goutte et des conditions thermodynamiques ; a décrit l'effet de sphéricité :

$$a = \frac{2\gamma_l \cdot \bar{u}_w}{R_{GP} \cdot T} \quad (1-59)$$

et b décrit la contribution du soluté :

$$b = \frac{6n \cdot \bar{u}_w}{\pi} \quad (1-60)$$

avec  $\bar{u}_w$  le volume molaire de l'eau pure et n le nombre de moles de soluté.

La figure 1-23 présente la courbe de Köhler pour une solution de gouttes formées à partir d'un noyau de condensation de sulfate d'ammonium.

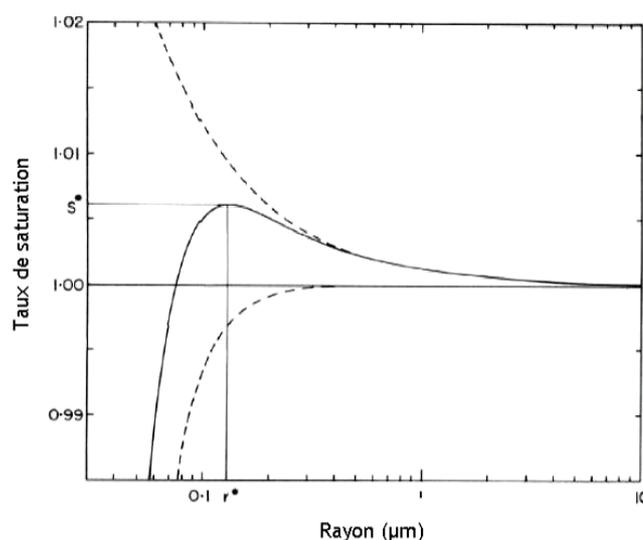


Figure 1-23 : Courbe de Köhler pour une solution de gouttes formées à partir d'un noyau de condensation de sulfate d'ammonium de  $10^{-16}g$

Le maximum de la courbe,  $S^*$  (saturation critique) est atteint pour le rayon critique  $r^* = \left(\frac{3b}{a}\right)^{1/2}$ . Pour des rayons  $r > r^*$ , la particule est en équilibre instable avec l'environnement. En effet, pour un point d'équilibre situé sur la branche décroissante, si une petite perturbation cause la diffusion de quelques molécules d'eau vers l'aérosol, alors celui-ci, plus gros, aura une pression d'équilibre plus faible que la pression de l'environnement. Cela aura pour conséquence la diffusion de nouvelles molécules d'eau vers l'aérosol qui va croître de plus en plus. Inversement, suivant le même raisonnement, des particules de rayon  $r < r^*$  sont en équilibre stable avec leur environnement. Ainsi, dans une phase d'ascendance, lorsque la saturation de l'environnement atteint la saturation critique, l'aérosol passe dans une phase de croissance irréversible. Il est alors dit activé et devient noyau de condensation.

Lorsque la vapeur se condense sur un noyau de condensation solide, le mécanisme de formation de gouttelettes est finalement le même qu'en condensation homogène mais il nécessite un taux de saturation plus faible, pouvant varier selon la nature et la forme de la particule.

Par exemple, si le noyau de condensation contient des substances chimiques actives avec la vapeur condensée, les conditions d'équilibre en seront altérées. Si le noyau de condensation est poreux, la condensation sera influencée par les forces de capillarité. La fraction soluble de l'aérosol a également une importance sur la nucléation puisqu'elle abaisse sa tension de surface. Svenningsson *et al.* (1997) montrent que des particules ayant 50 % de fraction soluble sont plus hygroscopiques que des particules n'en contenant que 5 % et que ces dernières nécessitent une saturation critique plus grande pour former des gouttelettes.

En météorologie, trois familles de noyaux de condensation sont établies en fonction de leurs affinités avec l'eau :

- les noyaux hygroscopiques,
- les noyaux neutres,
- les noyaux hydrophobes.

La nucléation d'un aérosol neutre nécessite la même saturation du milieu que pour observer le phénomène de nucléation homogène.

#### IV.3.2. Noyaux hygroscopiques

L'origine du caractère hygroscopique d'un aérosol est physique et chimique. Ce dernier influe sur :

- la tension de surface, par le remplacement de molécules d'eau par le soluté à l'interface eau-milieu,
- la pression de vapeur, si la pression du solvant est inférieure à celle du soluté,
- les liaisons de faible énergie et les liaisons Van der Waals.

##### a. Déliquescence et efflorescence

Lorsque l'humidité relative augmente jusqu'à une valeur seuil, appelée Humidité Relative de Déliquescence (HRD), les particules cristallines captent spontanément l'eau pour former des gouttelettes salines de plus gros volume. Réciproquement, lorsque l'humidité relative diminue, les particules salines aqueuses d'aérosol commencent par rétrécir par évaporation puis se cristallisent finalement à une valeur d'humidité relative appelée Humidité Relative d'Efflorescence (HRE) ou de délitescence.

La déliquescence d'un aérosol se produit à la valeur d'humidité relative pour laquelle l'énergie libre correspondant à la forme cristalline entourée par de la vapeur d'eau et l'énergie libre correspondant à la forme aqueuse sont égales (Martin, 2000 cité par Biskos, 2006).

L'énergie libre  $E$  d'une particule est la somme de son énergie libre volumique (indice V) et de son énergie libre surfacique (indice S) :

$$E_c = E_{V,c} + E_{S,c} \quad (1-61)$$

$$E_{aq} = E_{V,aq} + E_{S,aq} \quad (1-62)$$

avec les indices c pour la forme cristalline et aq pour la forme aqueuse. Ainsi, pour une particule de sel :

$$E_{V,c} = \psi_c \cdot n_{sel} + (\psi_w \cdot n_w)_{gaz} \quad (1-63)$$

$$E_{S,c} = \gamma_c \cdot a_c \quad (1-64)$$

$$E_{V,aq} = \psi_{aq} \cdot n_{sel} + \psi_w \cdot n_w \quad (1-65)$$

$$E_{S,aq} = \gamma_{aq} \cdot a_{aq} \quad (1-66)$$

avec  $\psi$  le potentiel chimique,  $n$  le nombre de moles,  $a$  la surface de la particule et  $w$  l'indice pour l'eau.

$\gamma_c$  ne dépend pas de l'humidité relative et le potentiel chimique de l'eau est le même dans les deux expressions de  $E_c$  et  $E_{aq}$  (car le nombre de molécules d'eau dans la vapeur excède considérablement le nombre de molécules d'eau qui se condensent).

Une particule d'aérosol atteint son point de déliquescence lorsque pour une augmentation de l'humidité relative, l'équilibre suivant entre les énergies libres est atteint :

$$E_c(d_p, HR) = E_{aq}(d_p, HR) \quad (1-67)$$

soit :

$$E_c - E_{aq} = (\psi_c - \psi_{aq})n_{sel} + (\gamma_c \cdot a_c - \gamma_{aq} \cdot a_{aq}) = 0 \quad (1-68)$$

### Influence de la taille des particules

Biskos *et al.* (2006), en travaillant avec des aérosols de NaCl, montrent que l'humidité relative de déliquescence et l'humidité relative d'efflorescence augmentent lorsque le diamètre de la particule sèche diminue de 40 à 6 nm. Les auteurs expliquent que le bilan de l'énergie libre du NaCl favorise les petites particules (i.e. celles sans eau) car leurs surfaces spécifiques, et par conséquent leurs énergies libres surfaciques, sont plus faibles pour les petites particules anhydres que pour les particules aqueuses gonflées.

En ce qui concerne les particules de taille supérieure à 100 nm, les valeurs de HRD et de HRE sont considérées comme indépendantes de la taille des particules. Pour le NaCl, les différentes valeurs rencontrées dans la littérature à une température de 25 °C se situent autour de 75 % pour l'humidité relative de déliquescence et autour de 45 % pour l'humidité relative d'efflorescence.

### Influence de la température

De nombreuses études ont montré la dépendance de HRD et HRE avec la température. Tang *et al.* (2000) notamment ont établi une corrélation entre HRD et la température :

$$HRD_{(T)} = HRD_{(298)} \exp\left(\frac{\Delta H_s}{R_{GP}} \cdot \left( A \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) - B \cdot \ln \frac{T}{298} - C \cdot (T - 298) \right)\right) \quad (1-69)$$

avec  $\Delta H_s$  la variation d'enthalpie de la solution et A, B, C des constantes empiriques. Pour le NaCl, les auteurs proposent les coefficients suivants : A = 0,1805 ; B = -5,310.10<sup>-4</sup> ; C = 9,965.10<sup>-7</sup>.

#### b. Croissance d'un aérosol hygroscopique

Le paramètre choisi pour étudier la croissance d'un aérosol sous humidité est le facteur de croissance. Il est défini comme le rapport du diamètre de l'aérosol à l'humidité considérée sur le diamètre de l'aérosol sec.

Lorsque l'humidité relative augmente, la particule cristalline reste inchangée tant que son point de déliquescence n'est pas atteint. A l'humidité relative de déliquescence, la condensation de la vapeur d'eau forme spontanément une gouttelette de solution saturée, ce qui conduit à une augmentation de sa taille. En considérant la masse de l'aérosol, Tang *et al.* (2000) ont observé une augmentation de 3,8 fois son poids initial pour du chlorure de potassium (KCl) et 2,4 fois pour du NaCl. La gouttelette continue à croître par condensation tant que l'humidité relative augmente. Une fois la chute de l'humidité relative entamée, la goutte perd du poids par évaporation et voit donc son diamètre diminuer. La gouttelette est toujours sous forme liquide en dessous de son HRD. En effet, la gouttelette devrait être passée à l'état solide mais un retard dû à l'absence de germes de cristallisation la conserve en phase liquide. Ce phénomène ne peut avoir lieu qu'avec un corps très pur qui ne contient pas de germes cristallins. Cela cesse à l'humidité relative d'efflorescence, en dessous de laquelle le liquide cristallise même en l'absence de tout germe de cristallisation et passe alors à un état stable solide.

L'évolution du facteur de croissance peut être calculée par deux modèles issus de la théorie de Köhler qui sont présentés dans l'ANNEXE III.

### c. Cas du chlorure de sodium

Foster et Ewing (1999) ont étudié l'adsorption d'eau à la surface de cristaux de NaCl par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier par transmission. Les auteurs utilisent l'absorbance des molécules OH qui sont adsorbées à la surface du NaCl et émettent une fréquence particulière en fonction de leur nature (vapeur, liquide ou solide). Les résultats indiquent que l'eau adsorbée est sous forme liquide. Ainsi, les auteurs utilisent les propriétés optiques avec la loi de Beer-Lambert afin d'étudier la formation par couche adsorbée  $\Theta$  du film liquide. Les auteurs ont travaillé avec des températures comprises entre -27 et 40 °C et pour des taux d'humidité relative compris entre 0 et 60 %, soit inférieurs à la déliquescence du chlorure de sodium. La figure 1-24 représente une isotherme d'adsorption obtenue pour une température de -12 °C.

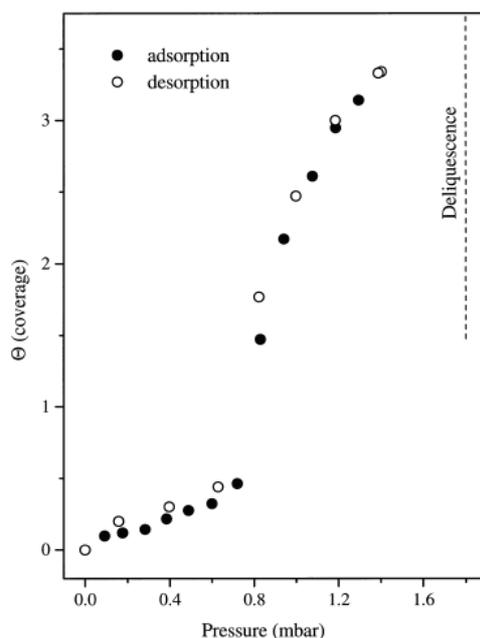


Figure 1-24 : Isotherme d'adsorption de l'eau par des cristaux de NaCl à une température de -12 °C (Foster et Ewing, 1999)

Les résultats indiquent trois régions de croissance distinctes dans la gamme de pression étudiée avec une augmentation brutale de l'isotherme. Les différents résultats révèlent que cette augmentation est initiée à un taux d'humidité d'autant plus faible que la température est faible ou encore pour une masse de vapeur contenue dans l'air plus faible. Selon la température, l'augmentation se situe entre 30 et 45 % d'humidité relative.

Foster et Ewing (1999) proposent un modèle d'adsorption de la vapeur d'eau à la surface du NaCl sous forme de film liquide, schématisé sur la figure 1-25. Pendant la création de la première couche de molécules adsorbées ( $\Theta = 0,5$ ), des liaisons hydrogène sont créées entre certaines molécules et forment un réseau à deux dimensions. Lorsque les molécules d'eau forment plusieurs couches à la surface du NaCl ( $\Theta = 3,0$ ), la croissance est tridimensionnelle et le réseau de liaisons hydrogène entre les molécules s'apparente à un arrangement tétraédrique. Une faible concentration d'ions, venant du substrat, peut être incorporée à l'intérieur du film recouvrant le NaCl. Entre ces deux situations ( $\Theta = 1,5$ ), il y a une étape de transition entre la croissance bidimensionnelle et tridimensionnelle des molécules ; les auteurs associent le saut obtenu sur les isothermes d'adsorption à cette étape de transition.

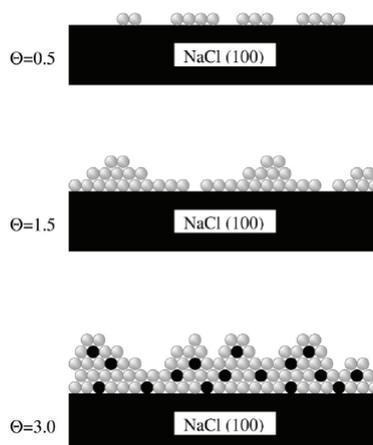


Figure 1–25 : Modèle de croissance par couches adsorbées de l'eau à la surface du NaCl (Foster et Ewing, 1999)

Ebert *et al.* (2002), qui ont observé par une technique d'observation microscopique à balayage environnemental ESEM (Environmental Scanning Electron Microscopy) la déliquescence de particules de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ainsi que de NaCl, confirment les travaux de Foster et Ewing (1999). Pour les particules de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , Ebert *et al.* (2002) n'observent pas de changement dans leur morphologie lorsque l'humidité relative atteint la valeur du point de déliquescence. En effet, l'augmentation de la pression d'eau conduit à la formation immédiate de gouttelettes. Pour le NaCl et comme le montre la figure 1–26, une adsorption substantielle d'eau à la surface des particules cristallines apparaît avant le point de déliquescence du sel. Cette pellicule d'eau sur la surface des particules de NaCl est stable pendant au moins 30 min, puisqu'aucune formation de gouttelettes n'a été observée pendant cette durée. Une fois la pression d'eau équivalente à l'humidité de déliquescence atteinte, la formation de gouttelettes se produit aussi rapidement que pour les autres sels étudiés.

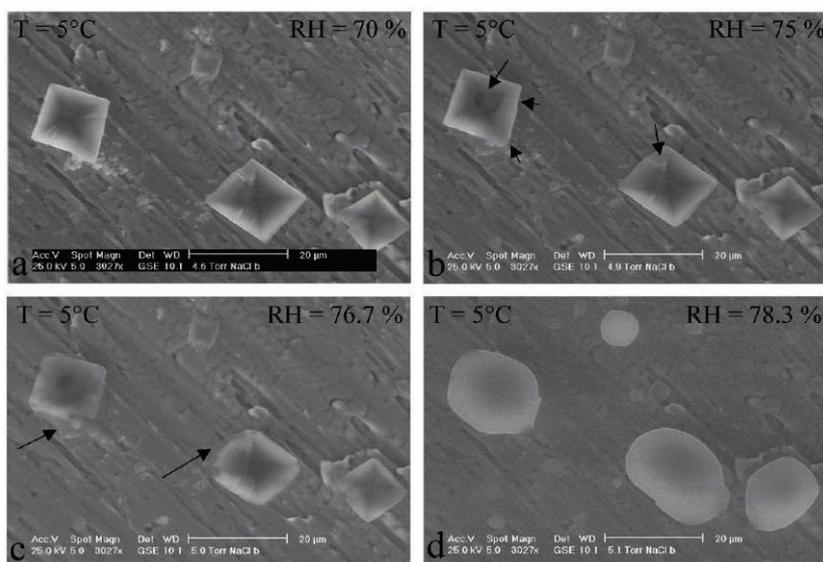


Figure 1–26 : Déliquescence de particules de NaCl à une température de 5 °C. (a) particule solide à 70 % HR, (b) premier changement détectable de morphologie due à une adsorption d'eau à 75 % HR, (c) présence d'un mince film liquide à la surface de toutes les particules à 76,7 %, (d) formation de gouttelette à HR de 78,3 % (Ebert *et al.*, 2002)

Ainsi l'adsorption de vapeur d'eau à la surface des particules solides de NaCl, pour des taux d'humidité relative inférieurs au point de déliquescence, entraîne une modification de l'état de surface des particules. La rugosité des particules est notamment altérée.

Aucune étude analytique concernant la cinétique d'adsorption de la vapeur d'eau à la surface de particules de NaCl n'a été recensée. Néanmoins, Krämer *et al.* (2000) ont étudié l'influence du temps d'interaction entre la vapeur d'eau et un aérosol de NaCl à travers l'évolution du diamètre de ce dernier mesuré avec un analyseur de mobilité électrique à différents taux d'humidité relative. Deux aérosols de NaCl de 92 et 144 nm de diamètre de mobilité électrique en air sec ont été testés pour une gamme d'humidité relative s'étendant de 1 à 90 %. En faisant varier le temps d'interaction entre 5 et 20 s, les auteurs n'ont observé aucune modification sur la valeur mesurée du diamètre de l'aérosol quelle que soit l'humidité relative. Ceci tend à démontrer que la cinétique d'adsorption est inférieure à 5 s pour les conditions de cette étude.

#### IV.3.3. Noyaux hydrophobes

Ebert *et al.* (2002) ont étudié l'activation d'agglomérats de suie à l'aide d'observations microscopiques (ESEM). Jusqu'à une humidité relative de 99-100 %, aucune adsorption d'eau par les particules n'a été observée. À une humidité de 100 % (ou à une légère saturation), les agglomérats deviennent actifs et un film d'eau apparaît. En diminuant l'humidité, l'évaporation de l'eau apparaît dès 100 %. Les auteurs constatent qu'après évaporation, les agglomérats se sont compactés.

Mikhailov *et al.* (2001) se sont également intéressés à l'interaction entre les gouttelettes d'eau et les particules de suie. Afin d'estimer la contribution de la surface hygroscopique de la particule sur l'interaction, les auteurs ont utilisé deux aérosols : un aérosol de suie supposé hydrophobe et un aérosol de suie enrichi en n-butanol dans le but de créer une surface hydrophile. L'analyse par microscope électronique a montré que la distribution granulométrique de l'aérosol pur de suie n'est pas modifiée de manière significative après l'interaction avec des gouttelettes d'eau, alors que la distribution granulométrique de l'aérosol de suie enrichi en n-butanol est modifiée : la taille moyenne a été réduite d'un facteur trois. L'explication avancée par les auteurs est que les particules mouillables, qui pénètrent à l'intérieur des gouttelettes d'eau pendant la coagulation, sont uniformément serrées par les forces capillaires et l'évaporation de l'eau, et deviennent ainsi plus compactes et par conséquent plus petites.

Dans le cas d'une poudre, la nature de l'eau piégée est fonction de la nature des solides, de l'humidité, de la température et de la pression. Si l'humidité relative est inférieure à une valeur critique caractéristique de chaque poudre, l'eau est présente sous forme de vapeur adsorbée à la surface entre les particules ; dans le cas contraire, des ponts liquides se forment. Dans le premier cas, la liaison inter-particulaire est causée par l'enveloppement des particules voisines par une couche d'eau adsorbée. L'intensité de cette liaison est proportionnelle à la tension superficielle du film adsorbé et à la surface de contact. Elle est influencée par la densité de l'arrangement des particules, la forme, la taille et la rugosité des particules. Quand l'humidité relative est supérieure à l'humidité critique, des ponts liquides se forment entre les particules et accroissent fortement les interactions particulières favorisant une nature cohésive, i. e. la formation d'agglomérats. Selon Turner, cité par Coelho et Harnby (1978), l'humidité relative critique pour laquelle apparaît la condensation s'étend de 65 à 80 % en fonction du type de poudre.

L'isotherme de sorption à 25°C de l'eau par un tas de poudre d'alumine a été réalisée par le Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, à l'aide d'une balance de sorption (Callé-Chazelet *et al.*, 2008 b). Les résultats indiquent que jusqu'à 60 % d'humidité relative, la prise en masse de l'échantillon est inférieure à 0,3 %, donc très faible. A 70 % d'humidité relative, correspondant à la valeur critique, un film liquide d'eau apparaît à la surface du tas de poudre, mettant fin à la mesure.

#### IV.3.4. Cas d'un aérosol mixte

Il semblerait que les aérosols composés d'un mélange de composés organiques et inorganiques présentent des limitations dans le transfert de masse d'eau, contrairement aux sels purs inorganiques qui s'équilibrent très rapidement. Sjogren *et al.* (2007) montrent que dans le cas d'aérosols mixtes, composés d'une phase organique insoluble et d'une phase inorganique, le transfert de matière (eau) de la vapeur environnante vers la solution inorganique, qui est emprisonnée dans les pores du solide, est ralenti par la diffusion dans la phase solide. Ainsi, dans le cas d'aérosols mixtes, le temps de contact de l'aérosol avec l'humidité environnante est plus important pour atteindre l'équilibre.

#### IV.4. Evolution d'une gouttelette

Les deux phénomènes à l'origine de la croissance d'une gouttelette pure ou d'un aérosol activé sont la coagulation et la condensation.

##### IV.4.1. Coagulation et condensation

La coagulation implique la collision d'une particule avec une autre, en raison du mouvement des particules entre elles ; le grossissement des gouttes par condensation dépend :

- du taux de saturation,
- du diamètre des gouttes,
- du nombre de Knudsen.

Ainsi, pour les petites gouttelettes ( $Kn_p > 1$ ), leur croissance est gouvernée par le taux de collision aléatoire des molécules de vapeur, qui est donné par la théorie cinétique des gaz. La vitesse de croissance des petites gouttelettes est donc indépendante de leur taille.

Pour les plus grosses gouttelettes ( $Kn_p < 1$ ), leur croissance n'est plus due aux chocs aléatoires des molécules mais à la diffusion sur leur surface. Dans ce cas, la vitesse de croissance est inversement proportionnelle à la taille des gouttelettes. Il est alors possible de faire l'analogie avec la coagulation des aérosols.

##### IV.4.2. Croissance en air saturé

Le phénomène de croissance en air saturé est extrêmement rapide. Dans le cas d'une gouttelette d'un diamètre initial de  $0,75 \mu\text{m}$  formée par nucléation sur une particule de NaCl à une saturation de 0,05 %, une pression de 90 kPa et une température de 273 K, les temps de croissance sont reportés dans le tableau 1-6.

Deux observations peuvent être faites :

- le processus de croissance peut faire passer un aérosol submicronique à la taille micronique très rapidement ;
- dans les premiers instants, plus la masse (donc le diamètre du noyau de condensation) est grande, plus la gouttelette croît rapidement ; puis, à partir d'un certain diamètre de goutte, son temps de croissance ne dépend plus de façon notable du diamètre initial du noyau de condensation.

Tableau 1-6 : Temps de croissance d'une goutte formée par nucléation sur une particule de NaCl (Rogers et Yau, 1989)

Masse du noyau de NaCl (g)	$10^{-14}$	$10^{-13}$	$10^{-12}$
Rayon ( $\mu\text{m}$ )	Temps de croissance de la goutte ( $r_p$ initial = $0,75 \mu\text{m}$ ) (s)		
1	2,4	0,15	0,013
2	130	7	0,61
4	1000	320	62
10	2700	1800	870
20	8500	7400	5900
30	17500	16000	14500
50	44500	43500	41500

Gupta *et al.* (2004) ont étudié l'effet des propriétés physico-chimiques, et en particulier de l'hygroscopicité de particules ultra fines (de diamètre inférieur à 0,1  $\mu\text{m}$ ), sur le taux de croissance. Les auteurs ont montré que les particules hygroscopiques croissent plus efficacement que les particules hydrophobes. Cet effet de l'hygroscopicité et de la solubilité diminue lorsque le taux de saturation augmente. Ainsi, pour un taux de saturation de 3, les auteurs estiment que la croissance des aérosols est indépendante de leur hygroscopicité.

Gupta *et al.* (2004) ont également mis en évidence que les taux de saturation expérimentaux sont supérieurs aux taux de saturation théoriques, issus de la théorie de Köhler. Les auteurs imputent cela à la condensation de la vapeur d'eau sur les parois de l'enceinte expérimentale entraînant une diminution de la quantité de vapeur d'eau disponible pour la croissance des gouttes.

### Bilan

*Cette partie a mis en évidence que l'interaction entre l'air humide et les fibres de verre qui constituent le medium est limitée, en particulier lorsque le medium a subi un traitement hydrofuge. Concernant l'influence de l'humidité sur le comportement d'un aérosol, elle dépend tout d'abord de la nature de l'aérosol considéré, et plus précisément de son affinité avec l'eau, et également de la valeur de l'humidité.*

*En air humide non saturé, il est important de distinguer les noyaux à caractère hygroscopique, des noyaux à caractère hydrophobe. Dans le premier cas, la taille de l'aérosol hygroscopique évolue peu jusqu'à ce que l'humidité relative de l'air atteigne la valeur de déliquescence de l'aérosol. Une fois cette valeur atteinte, la taille de l'aérosol peut doubler subitement en s'activant, i. e. en formant une gouttelette. Si l'humidité relative augmente encore, la gouttelette formée croît par condensation. Si l'humidité relative chute, la gouttelette perd des molécules d'eau et sa taille se réduit jusqu'à ce que l'humidité relative atteigne la valeur d'efflorescence et que l'aérosol retourne sous forme solide. En ce qui concerne les noyaux hydrophobes, l'aérosol n'est le plus souvent activé qu'à partir d'une humidité relative de 100 % ou d'une légère saturation.*

*En air saturé, les aérosols activés sont sous forme liquide et leur croissance peut être déterminée par l'équation de Köhler. Pour une faible saturation, les noyaux hygroscopiques croissent plus vite que les noyaux hydrophobes, mais pour une saturation importante, les taux de croissance peuvent être considérés comme semblables. De même, plus le diamètre de la goutte, qui dépend du diamètre initial de l'aérosol, est grand, plus petit sera le taux de saturation nécessaire pour que la goutte soit stable.*

*La cinquième et dernière partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de l'évolution des caractéristiques et des performances d'un filtre THE soumis à un courant d'air humide.*

## **V. FILTRATION THE SOUS HUMIDITE**

Les filtres THE sont conçus pour travailler en présence de taux d'humidité relative modérés, du moins en régime de fonctionnement normal d'une installation. La norme AFNOR NFX 44-011 impose d'ailleurs la mesure du coefficient d'épuration des filtres à un taux d'humidité relative inférieur à 80 %. Cependant, certaines situations peuvent conduire à des taux d'humidité relative plus élevés ou à une non mesure de cette dernière lors des tests de filtres sur site.

De façon générale, il convient de dire que la présence d'humidité est susceptible d'entraîner :

- une augmentation de la perte de charge et de la masse du filtre,
- une diminution de la résistance mécanique, qui est la valeur de la perte de charge du filtre pour laquelle l'intégrité du medium n'est plus respectée, et de l'efficacité du filtre.

L'importance de ces effets est liée à la capacité du medium d'empêcher l'infiltration de l'eau. Selon Laborde (2000), les paramètres pouvant altérer cette capacité sont essentiellement la nature du medium (hydrofugé ou non), le colmatage initial du filtre, le vieillissement, un mauvais plissage du medium et les rayonnements radioactifs (qui peuvent jouer sur le caractère hydrofuge du medium).

Dans cette dernière partie de l'étude bibliographique, l'influence de la présence d'humidité est étudiée au niveau des performances d'un filtre vierge et d'un filtre colmaté.

## V.1. Influence de l'humidité sur le medium vierge

Ricketts *et al.* (1987) citent un certain nombre de paramètres, de nature aéraulique ou bien propres au medium filtrant, susceptibles d'interagir avec plus ou plus d'importance sur la quantité d'eau contenue dans le medium à l'équilibre et ainsi sur ses performances : la température, la vitesse de filtration ainsi que le taux d'humidité sont des paramètres importants, mais également le diamètre des fibres, la porosité, son traitement hydrofuge, son niveau de pré-colmatage et enfin ses propriétés de drainage.

### V.1.1. Influence de l'humidité sur la perte de charge

Selon Hajra *et al.* (2003), la présence de vapeur dans l'air peut conduire à une condensation de gouttelettes d'eau dans le filtre qui réduit la quantité de pores disponibles pour le passage de l'air ; ainsi, l'altération des propriétés de surface des fibres constituant le medium conduit à une augmentation de la perte de charge du filtre.

Gupta *et al.* (1993) n'ont observé aucun changement sur la perte de charge d'un filtre plan vierge hydrofugé en fibres de verre, lorsque celui-ci est soumis à des taux d'humidité relative compris entre 1 et 100 %. Les résultats de Miguel (2003) confirment ces résultats ; en effet, les travaux sur des filtres plans en fibres de polyester montrent que la perméabilité du medium n'est pas affectée par la présence d'humidité durant les mesures pour une gamme d'étude s'étendant de 32 à 90 % d'humidité relative à une température de 25 °C.

### V.1.2. Influence de l'humidité sur la résistance mécanique et la perméance

Lorsque le filtre est exposé à de forts taux d'humidité relative (85 et 90 %) et à des températures élevées (85 °C), Normann (1987) observe une diminution de la résistance mécanique du filtre de 100 à 67 kPa après 1 h d'exposition. Ricketts *et al.* (1987) ont fait les mêmes observations en conditionnant leurs filtres sous forte humidité et à 50 °C : une diminution de 60 à 90 % de la valeur de résistance mécanique a été observée selon les types de filtres testés.

En conditions de vapeur pure et à 100 °C, Normann (1987) n'observe pas d'évolution sensible de la perte de charge des filtres, même après 6 h d'exposition, mais une baisse spectaculaire de la résistance mécanique qui passe de 100 à 18 kPa après 6 h d'exposition sur certains filtres testés. Des mesures de perméance ont également été effectuées : une augmentation de la perméance des particules de DOP est observée dès 2 h d'exposition. Les travaux d'Adams, cité par Laborde (2000), sur la perméance confirment les résultats de Normann (1987). En effet, Adams a montré que la perméance d'un filtre hydrofugé augmente d'un facteur 2,5 lorsque l'humidité relative passe d'une valeur ambiante à 100 % ; dans le cas d'un filtre non hydrofugé, les effets de l'humidité sont plus importants et la perméance augmente d'un facteur 10.

Ainsi, l'interaction entre l'humidité et le medium filtrant semble être influencée par différents paramètres. Le premier paramètre est la durée d'exposition. En effet, Gupta *et al.* (1993) n'observent aucune modification sur la perte de charge du medium soumis à un important taux d'humidité relative alors que les résultats de Normann (1987) révèlent une augmentation de la perte de charge du filtre pour des taux d'humidité relative supérieurs à 90 %. La durée d'exposition du medium au flux d'air humide peut être un des paramètres qui agit sur l'influence de l'humidité. Le second paramètre, et sans doute le plus prévisible, est le caractère hydrofuge du medium. Les observations d'Adams, cité par Laborde (2000), montrent la nécessité pour maintenir l'efficacité du medium de conserver intact son caractère hydrofuge. Or, des études menées par Robinson et Horak, cités par Laborde (2000), indiquent que des doses de rayonnement de  $5.10^5$  Grays réduisent d'un facteur 100 les propriétés hydrofuges de la fibre de verre traitée.

## V.2. Influence de l'humidité sur le colmatage de filtres plans

La présence d'humidité durant le colmatage de filtres THE plans a été tout particulièrement étudiée par Gupta *et al.* (1993). Cette étude a permis de mettre en évidence une influence de l'hygroscopicité et de la granulométrie de l'aérosol sur l'évolution de la perte de charge des filtres en présence d'humidité.

### V.2.1. Influence de l'humidité durant la filtration d'aérosols non-hygroscopiques

Gupta *et al.* (1993), qui ont travaillé avec un aérosol non-hygroscopique micronique d'oxyde d'aluminium, observent une évolution linéaire de la perte de charge des filtres en fonction de la masse surfacique de particules collectées. Concernant l'influence de l'humidité, les résultats indiquent que pour une même masse de particules déposées, la perte de charge du filtre est d'autant plus faible que le colmatage a été effectué sous forte humidité. En d'autres termes, la résistance spécifique du gâteau de particules diminue lorsque l'humidité relative de l'air augmente. Avec un aérosol non-hygroscopique submicronique d'oxyde d'aluminium, les résultats de Gupta *et al.* (1993) montrent que l'effet de l'humidité sur la perte de charge n'est perçu qu'à partir d'un taux d'humidité relative de 90 % ; au-delà, pour une même masse de particules collectées la perte de charge diminue plus sensiblement en fonction de l'humidité que pour les aérosols microniques.

Vendel et Letourneau (1995), en travaillant avec des filtres industriels en fibres métalliques et des particules de dioxyde de titane submicroniques, n'observent aucune influence sensible de l'humidité relative jusqu'à 85 % sur l'évolution de la perte de charge des filtres.

Les travaux d'Ariman et Helfritch (1977), avec des filtres en polyester, indiquent également une diminution de la résistance spécifique des gâteaux formés de particules non-hygroscopiques lorsque l'humidité relative de l'air augmente de 20 à 80 %.

Selon Gupta *et al.* (1993), cet effet de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge du filtre peut être attribué à une augmentation des forces d'adhésion particule-particule lorsque l'humidité augmente. Ainsi, durant la formation du gâteau, les particules ont tendance à s'agglomérer entre elles plutôt qu'à remplir les espaces interstitiels. Le gâteau formé a donc une structure plus aérée et par conséquent, une perte de charge plus faible pour une même masse de particules collectées.

Selon Ariman et Helfritch (1977), en plus d'une augmentation des forces d'adhésion entre les particules, la présence d'humidité pourrait modifier la taille des particules, ainsi que la charge électrostatique sur les fibres et les particules.

Jeon et Jung (2004) ont étudié l'influence des forces d'adhésion entre les particules sur la formation d'un gâteau de particules par une méthode de simulation. Le gâteau de particules est découpé en  $n$  couches dont la hauteur est égale au diamètre des particules formant le gâteau. Seules les forces de Van der Waals sont considérées et les auteurs les font varier en modifiant la valeur de la constante de Hamaker. Les résultats de la simulation, représentés sur la figure 1–27, révèlent que, quand la constante de Hamaker est petite, i. e. lorsque les forces d'adhésion sont faibles, la morphologie du gâteau de particule a une structure compacte ; à l'inverse, pour une plus grande valeur de la force de Hamaker, le gâteau de particules a une structure plus aérée. Ces résultats abondent vers l'hypothèse de Gupta *et al.* (1993), selon laquelle l'augmentation des forces d'adhésion entre les particules crée un gâteau plus poreux.

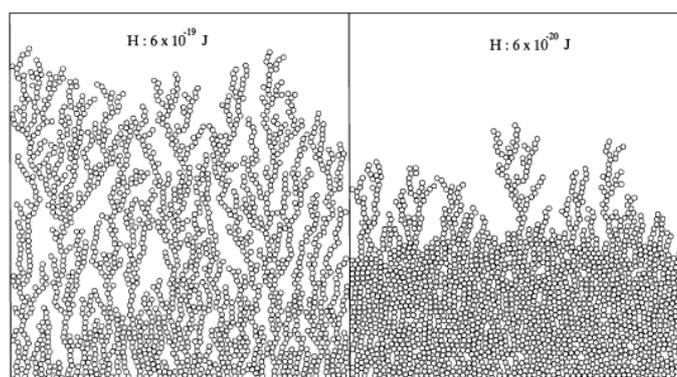


Figure 1–27 : Simulation de l'influence des forces d'adhésion entre les particules sur la morphologie du gâteau de particules (Jeon et Jung, 2004)

## V.2.2. Influence de l'humidité durant la filtration d'aérosols hygroscopiques

### a. Humidité en dessous du point de déliquescence

Gupta *et al.* (1993) ont étudié l'influence de la présence d'humidité durant le colmatage d'un filtre THE plan par un aérosol hygroscopique de chlorure de sodium. En dessous du point de déliquescence, la perte de charge du filtre augmente de façon linéaire avec la masse surfacique de particules collectées, tout comme avec les aérosols non-hygroscopiques, et diminue pour une masse surfacique et des conditions opératoires données, lorsque l'humidité relative augmente.

Les résultats de Gupta *et al.* (1993) révèlent que l'effet de l'humidité est cependant plus marqué que pour les aérosols non-hygroscopiques. Selon les auteurs, l'adhésion des particules hygroscopiques est plus importante que celle des particules non-hygroscopiques pour des taux d'humidité élevés ; ainsi, la perte de charge du filtre est plus faible pour une même masse surfacique de particules déposées. L'influence de l'humidité est également plus importante lorsque l'aérosol hygroscopique est submicronique plutôt que micronique.

Miguel (2003), en travaillant avec un aérosol hygroscopique de chlorure de sodium et un aérosol non-hygroscopique d'oxyde d'aluminium, témoigne des mêmes observations pour des filtres en fibres de polyester.

Chay and Chen (2004) ont étudié l'influence de la présence d'humidité entre 5 et 70 % d'humidité relative, durant le colmatage de différents media fibreux constitués de cellulose ou de fibres de verre avec un aérosol submicronique de chlorure de sodium et un aérosol atmosphérique respectivement de 0,16 et 1,44  $\mu\text{m}$  de diamètre médian en nombre. Les résultats obtenus avec les différents media pour l'aérosol de chlorure de sodium témoignent, comme pour Gupta *et al.* (1993) et Miguel (2003), d'une amélioration des capacités de collecte des filtres lorsque l'humidité de l'air augmente ; avec l'aérosol atmosphérique, Chay and Chen (2004) ne constatent aucun effet notable de l'humidité, dans leur gamme de travail, sur l'évolution de la perte de charge des différents media testés.

La figure 1-28 schématise l'influence de l'humidité sur le colmatage d'un filtre plan THE par un aérosol non-hygroscopique ou un aérosol hygroscopique en dessous de son point de déliquescence.

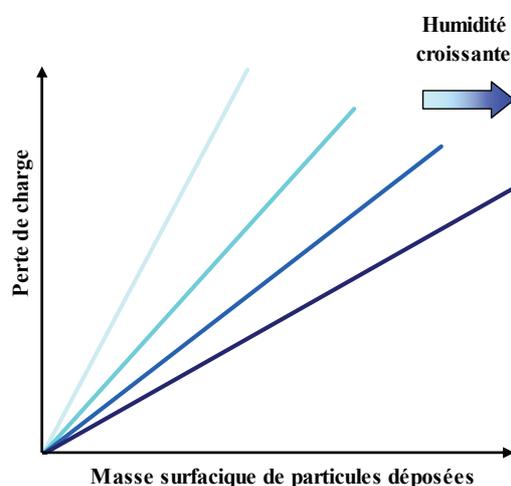


Figure 1-28 : Schématisation de l'influence de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre THE plan en fonction de la masse surfacique de particules collectées pour un aérosol non-hygroscopique ou un aérosol hygroscopique en dessous de son point de déliquescence

### b. Humidité au-dessus du point de déliquescence

Les résultats de Gupta *et al.* (1993), avec un aérosol de chlorure de sodium et pour des taux d'humidité relative supérieurs à son point de déliquescence, indiquent que la perte de charge d'un filtre plan THE augmente brutalement de manière non linéaire à partir d'une certaine masse de particules collectées. En effet, lorsque l'humidité atteint la valeur de déliquescence de l'aérosol, celui-ci passe de l'état solide à l'état liquide.

Ainsi, il n'y a pas de formation de gâteau à la surface du medium mais une filtration des gouttelettes formées : les gouttelettes commencent par remplir l'espace interstitiel entre les fibres jusqu'à ce qu'un film liquide se forme à la surface du medium entraînant une brusque augmentation de la perte de charge du filtre (Contal *et al.*, 2004). La figure 1–29 schématise l'évolution de la perte de charge d'un filtre lorsque l'humidité est au-dessus du point de déliquescence de l'aérosol. Vendel et Letourneau (1995) observent le même type de résultats avec des filtres en fibres métalliques et pour des aérosols microniques de chlorure de sodium et d'hydroxyde de césium.

Les résultats de Gupta *et al.* (1993) révèlent que la brusque augmentation de la perte de charge du filtre, due à la formation du film liquide, s'opère pour une masse surfacique de particules collectées d'autant plus faible que l'humidité relative est proche du point de déliquescence, pour un même diamètre initial de particules de NaCl. Selon les auteurs, pour des taux d'humidité relative supérieurs au point de déliquescence de l'aérosol, la tension superficielle des gouttelettes et leur pénétration dans le medium sont inversement proportionnelles, la tension superficielle étant plus importante à faible humidité. Les espaces interstitiels proches de la surface du filtre sont comblés d'autant plus vite que l'humidité est faible et que le diamètre de l'aérosol liquide est petit. C'est pourquoi le film liquide est formé pour une masse de gouttelettes collectées plus faible lorsque l'humidité est proche du point de déliquescence, que lorsqu'elle devient plus importante.

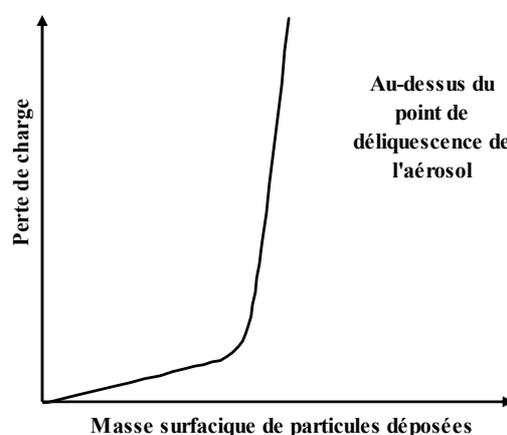


Figure 1–29 : Schématisation de l'évolution de la perte de charge d'un filtre THE en fonction de la masse surfacique de gouttelettes collectées d'un aérosol hygroscopique pour une humidité au-dessus de son point de déliquescence

### V.2.3. Cas de filtres pré-colmatés soumis à une contrainte humide

Ricketts *et al.* (1991) ont étudié l'influence d'un conditionnement sous humidité d'un filtre pré-colmaté. Les filtres testés ont été colmatés avec un aérosol atmosphérique à une valeur comprise entre 290 et 800 Pa pour une vitesse de filtration de  $2,5 \text{ cm.s}^{-1}$ , ce qui correspond à des masses surfaciques de particules déposées de  $0,1$  à  $4 \text{ g.m}^{-2}$ . Les filtres sont ensuite exposés à un courant d'air humide pendant plusieurs heures.

Les résultats, présentés sur la figure 1–30, montrent qu'un accroissement de la perte de charge se produit pour une humidité relative supérieure à 70 %. Au-delà de cette valeur, la cinétique d'accroissement et le régime d'équilibre atteint par la perte de charge augmentent avec l'humidité relative.

Aucune explication sur les mécanismes physiques entraînant ces modifications de perte de charge n'a été proposée par les auteurs. Néanmoins, l'aérosol atmosphérique contenant une fraction plus ou moins importante de composés hygroscopiques, cela pourrait expliquer l'augmentation de la perte de charge avec l'humidité. Ce type de résultat reste donc attribuable à un aérosol atmosphérique et ne peut pas être généralisé à tous les aérosols, en particulier aux aérosols non-hygroscopiques.

Franklin *et al.* (1976) ont étudié l'influence d'un changement d'humidité en fin de colmatage. Dans ce cas et contrairement à Ricketts *et al.* (1991), le débit d'air à travers le filtre est maintenu constant durant tout le colmatage ainsi que durant l'exposition à l'air humide. Des filtres plans Moyenne Efficacité (nature des fibres non précisée) sont colmatés en air sec avec un aérosol submicronique d'uranine de  $0,05 \mu\text{m}$  de diamètre médian en nombre ; puis, une fois la génération d'aérosol stoppée, de l'air humide est injecté. Les résultats de Franklin *et al.* (1976) révèlent que l'injection d'humidité conduit à une baisse rapide de la perte de charge des filtres qui se stabilise à une valeur proche de celle du filtre vierge. Les auteurs ne précisent pas la valeur du taux d'humidité ni la masse de particules déposées sur le filtre.

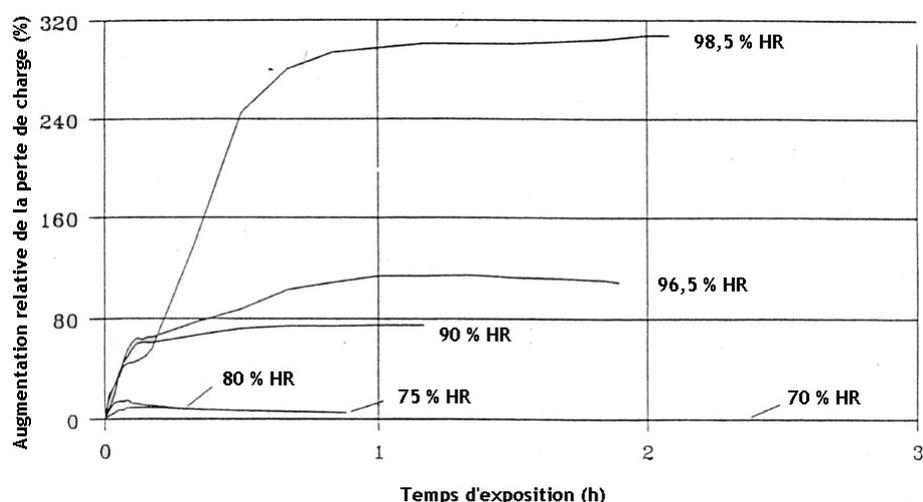


Figure 1-30 : Influence de l'humidité relative sur l'accroissement de la perte de charge d'un médium filtrant plan pré-colmaté à l'aérosol atmosphérique, à  $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $U_f=2,5 \text{ cm.s}^{-1}$  (Ricketts *et al.*, 1991)

### V.3. Influence de l'humidité en filtration industrielle

Ce paragraphe est largement inspiré d'essais menés au laboratoire de filtration du FZK (ForschungsZentrum Karlsruhe) à travers les études de Ricketts *et al.* (1987, 1989, 1991). Les travaux d'une équipe américaine du Nouveau Mexique (Gregory *et al.*, 1983 et Smith *et al.*, 1993), dont les objectifs sont de prédire le comportement des filtres THE en cas de catastrophe naturelle comme une tornade, sont également présentés.

#### V.3.1. Influence de l'humidité sur la résistance mécanique d'un filtre pré-colmaté

Smith *et al.* (1993) ont étudié la résistance mécanique de filtres THE à plis profonds (dimension de la cellule filtrante :  $610 \times 610 \times 292 \text{ mm}^3$ ) pré-colmatés sous haute ou basse humidité, par un aérosol de chlorure de sodium. Les filtres sont testés de manière à simuler les effets d'une tornade en provoquant un stress de pression. Aucune information n'est donnée sur la granulométrie de l'aérosol ni la masse surfacique déposée sur les filtres. Ces essais permettent d'appréhender l'influence de l'humidité du pré-colmatage sur la résistance mécanique d'un filtre. Le tableau 1-7 rassemble les résultats obtenus sur ces tests de rupture mécanique.

Tableau 1-7 : Tests de rupture mécanique de filtres THE sous humidité (Smith *et al.*, 1993)

Condition de colmatage	Temps de rupture (s)	Pression de rupture (hPa)
Filtre colmaté sous faible humidité (HR=13 %)	0,97	46,9
Filtre colmaté sous faible humidité (HR=14 %)	1,21	58,1
Filtre colmaté sous forte humidité (HR=73 %)	1,28	81,0
Filtre colmaté sous forte humidité (HR=84 %) après 4 h de conditionnement sous forte humidité (HR=100 %)	1,16	34,7
Filtre vierge	1,42	84,5

Les résultats de Smith *et al.* (1993) indiquent qu'un filtre colmaté à basse humidité a une résistance mécanique inférieure à celle d'un filtre vierge. Lorsque le filtre est colmaté sous forte humidité, la résistance mécanique est sensiblement égale à celle du filtre vierge. Selon Smith *et al.* (1993) :

- sous faible humidité, l'aérosol se trouve sous forme de fines particules solides qui s'agglomèrent peu. Ainsi, les particules sont captées à l'intérieur du medium, ce qui entraîne une plus grande valeur de perte de charge ;
- pour des taux d'humidité relative supérieurs au point de déliquescence de l'aérosol, ce dernier se trouve sous forme de gouttelettes liquides qui peuvent s'agglomérer et former de plus grosses gouttes. Quand les gouttelettes rencontrent le medium, elles se cristallisent, formant une croûte presque continue à la surface du filtre. Ainsi, très peu de particules pénètrent à l'intérieur du medium qui se comporte donc presque comme s'il était vierge.

Les résultats de Smith *et al.* (1993) révèlent également que le conditionnement préalable d'un filtre sous un taux d'humidité relative de 100 % pendant 4 h conduit à une baisse de 50 % de sa résistance mécanique par rapport à sa valeur initiale (filtre vierge).

Aucune hypothèse n'est avancée pour expliquer ce phénomène. Néanmoins, ces résultats semblent en accord avec ceux de Normann (1987) qui montrent qu'en conditions d'air saturé et à 100 °C, la résistance mécanique d'un filtre vierge diminue fortement.

Les résultats de Smith *et al.* (1993) suggèrent, d'une part qu'un filtre colmaté par un aérosol à un taux d'humidité relative inférieur au point de déliquescence a une résistance mécanique plus faible que si le colmatage se passe à un taux d'humidité relative supérieur au point de déliquescence, d'autre part que le conditionnement sous air saturé diminue sévèrement la résistance mécanique du filtre.

Ricketts *et al.* (1987) ont montré qu'une exposition prolongée d'un filtre vierge sous humidité peut réduire sa résistance mécanique de 60 à 90 % par rapport à sa valeur en air sec. Pour un filtre pré-colmaté soumis à un fort taux d'humidité et à 50 °C, l'effet sur la résistance mécanique est insignifiant pour les filtres à plis profonds alors que, pour les filtres à petits plis, la résistance mécanique est deux fois plus importante que celle des filtres vierges. Cela semble confirmer les résultats de Smith *et al.* (1993) et met également en évidence que la conception des filtres est un paramètre particulièrement important.

### V.3.2. Influence de l'humidité sur l'évolution de la résistance d'un filtre durant son colmatage

Gregory *et al.* (1983) ont étudié l'influence de l'humidité sur l'évolution de la résistance aéraulique d'un filtre à plis profonds colmaté avec un aérosol submicronique d'acide stéarique de 0,5 µm de diamètre. Les résultats de Gregory *et al.* (1983) indiquent que la résistance aéraulique du filtre, pour une même masse d'aérosol déposé, est d'autant plus grande que l'humidité de l'air est faible. En d'autres termes, pour une même masse d'aérosol déposé sur le filtre, la résistance aéraulique du filtre est plus faible lorsque le colmatage se fait en conditions humides. Une fois la saturation atteinte, l'injection supplémentaire d'eau conduit encore à une baisse de la résistance aéraulique du filtre pour une même masse d'aérosol déposé. Les masses de particules déposées sur les filtres varient entre 1 et 6 kg mais la surface de filtration n'est pas précisée.

En condition d'air saturé, l'allure de la courbe est modifiée et tend vers l'allure d'une courbe de colmatage de filtre par un aérosol hygroscopique à un taux d'humidité relative supérieur à son point de déliquescence.

Les résultats de Gregory *et al.* (1983) sont donc en accord avec ceux observés sur filtres plans par Gupta *et al.* (1993) avec un aérosol hygroscopique. Néanmoins, ces travaux concernent des filtres à plis profonds et aucune étude n'a été recensée dans la littérature concernant l'influence de l'humidité sur l'évolution de la résistance d'un filtre à petits plis durant son colmatage.

### V.3.3. Filtres plissés soumis à un courant d'air sursaturé

#### a. Influence de la conception des filtres

Ricketts *et al.* (1989) ont étudié l'élévation de la perte de charge de différents types de filtres vierges soumis à un débit d'air de  $1700 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  contenant une concentration d'eau dans l'air de  $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  à  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ricketts *et al.* (1989) ont testé des filtres à plis profonds standards, des filtres à plis profonds pour haute température ainsi que des filtres à petits plis.

Une forte dispersion des résultats pour un filtre de conception donnée a été mise en évidence. En effet, pour un filtre à plis profonds standard par exemple, le temps d'exposition nécessaire pour atteindre une perte de charge de  $4000 \text{ Pa}$  varie de 3 min à presque 5 h. Les auteurs attribuent cette dispersion des résultats à la variabilité des propriétés hydrofuges des media. En ce qui concerne les filtres à petits plis, les expériences ont montré qu'au-delà de  $2500 \text{ Pa}$ , les nappes des filtres se déforment, entraînant leur détérioration, et cela pour des pertes de charge plus faibles qu'avec des filtres à plis profonds.

#### b. Influence d'un pré-colmatage à l'aérosol atmosphérique

Ricketts *et al.* (1989) ont étudié l'influence de deux niveaux de pré-colmatage ( $30$  et  $100 \text{ daPa}$ ), par un aérosol atmosphérique, sur l'évolution de la perte de charge de filtres THE à plis profonds durant une exposition à un courant d'air saturé.

Les résultats indiquent que le pré-colmatage du filtre accélère dans un premier temps l'augmentation de la perte de charge, due à la présence d'eau dans l'air, puis dans un second temps améliore les propriétés hydrofuges du medium en ralentissant l'augmentation de perte de charge. Un pré-colmatage important du filtre permet même d'atteindre un palier d'équilibre de la perte de charge du filtre avant sa rupture lorsque l'humidité de l'air est proche de la saturation. Le même type de palier d'équilibre est observé en filtration liquide lorsque le drainage du liquide est établi. Ricketts *et al.* (1989) précisent que des filtres pré-colmatés avec des particules de suie ou de charbon actif n'ont pas montré les mêmes résultats.

Aucune étude de ce type n'a été recensée dans la littérature pour des filtres à petits plis.

#### c. Influence de l'orientation des plis

Ricketts *et al.* (1989) ont étudié l'influence de la direction du flux d'air et de l'orientation des plis sur l'augmentation de la perte de charge d'un filtre plissé soumis à un courant d'air saturé. Pour cela, les filtres ont été testés avec des courants d'air horizontaux et également des courants d'air verticaux avec deux orientations de plis différentes : un flux d'air vertical dirigé vers le bas ou vers le haut. Les essais ont été effectués sur des filtres vierges et sur des filtres fortement pré-colmatés.

Les résultats révèlent que c'est en conditions de flux vertical vers le bas, que l'augmentation de la perte de charge est la plus faible puisqu'elle n'est que de  $100 \text{ daPa}$  après 12 h d'exposition à un courant d'air saturé. Les auteurs attribuent ceci au fait que, dans cette position, le drainage de l'eau est favorisé.

### Bilan

*Différentes études ont permis d'améliorer les connaissances sur l'influence de l'humidité en filtration THE. Trois tableaux de synthèse résumant les principaux résultats sont proposés :*

- *le tableau 1–8 synthétise les résultats concernant l'évolution de la perte de charge, de la résistance mécanique et de l'efficacité d'un filtre THE plissé vierge hydrofugé soumis à un air humide, saturé ou sursaturé,*
- *le tableau 1–9 présente les résultats relatifs à l'influence de l'humidité de l'air sur la perte de charge et la résistance mécanique d'un filtre plissé pré-colmaté à l'aérosol atmosphérique,*
- *le tableau 1–10 regroupe les résultats correspondant à l'influence de la nature de l'aérosol de colmatage et de l'humidité de l'air sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre plan THE hydrofugé.*

Il en ressort tout d'abord que l'hygroscopicité de l'aérosol est un paramètre essentiel. En effet, pour un aérosol hygroscopique, comme le chlorure de sodium, lorsque l'humidité relative de l'air est supérieure à son point de déliquescence, la perte de charge du filtre augmente de manière exponentielle à partir d'une certaine masse de gouttelettes collectées ; ainsi, il peut s'avérer difficile de maintenir le débit d'air à travers le filtre dans le cas d'un réseau de ventilation industriel.

Dans le cas d'un aérosol non-hygroscopique ou d'un aérosol hygroscopique à un taux d'humidité relative inférieur à son point de déliquescence, la présence d'humidité améliore les capacités d'un medium filtrant plan THE, en particulier en termes de perte de charge ; en effet, il est plus intéressant de travailler sous humidité puisqu'à masse d'aérosol déposée égale, la perte de charge du medium est plus faible lorsque l'humidité de l'air est grande (tant que l'aérosol est sous forme solide). Néanmoins, la résistance mécanique du filtre peut être plus ou moins altérée selon la durée d'exposition au courant d'air humide et à son intensité.

Tableau 1-8 : Evolution de la perte de charge ( $\Delta P$ ), de la résistance mécanique ( $R_m$ ) et de l'efficacité ( $CE$ ) d'un filtre THE plissé vierge hydrofugé soumis à un air humide, saturé ou sursaturé

	Air humide	Air saturé ou proche de la saturation	Air sursaturé
$\Delta P$	$\Delta P \nearrow$ légèrement à partir de 90 % HR	-	$\Delta P \nearrow$ brutalement quand condensation
$R_m$	$R_m \searrow$ selon la durée d'exposition et le type de filtre	$R_m \searrow$ jusqu'à 80 % selon la durée d'exposition et le type de filtre	-
CE	-	CE $\searrow$ dès 2 h d'exposition	-

Tableau 1-9 : Influence de l'humidité de l'air sur la perte de charge ( $\Delta P$ ) et la résistance mécanique ( $R_m$ ) d'un filtre plissé pré-colmaté à l'aérosol atmosphérique

	Air humide	Air saturé ou proche de la saturation	Air sursaturé
$R_m$	$R_m \searrow$ si pré-colmatage à HR faible	$R_m \searrow$ jusqu'à 50 % si conditionnement air saturé pendant 4 h et filtre pré-colmaté sous HR forte	$\Delta P$ d'un filtre pré-colmaté $\nearrow$ plus vite dans les premiers instants. Puis, le pré-colmatage améliore les propriétés hydrofuges
$R_m$	identique à celle d'un filtre vierge si pré-colmatage à HR forte		

Tableau 1-10 : Influence de la nature de l'aérosol de colmatage et de l'humidité de l'air sur l'évolution de la perte de charge ( $\Delta P$ ) d'un filtre plan THE hydrofugé

	Aérosol hygroscopique	Aérosol non-hygroscopique
	HR < HRD	HR > HRD
$\Delta P$	$\Delta P \searrow$ quand HR $\nearrow$ pour une même masse de particules collectées	$\Delta P \nearrow$ brusquement à partir d'une certaine masse de gouttelettes collectées
		$\Delta P \searrow$ quand HR $\nearrow$ pour une même masse de particules collectées

## VI. CONCLUSION

Pour conclure, ce premier chapitre a révélé un manque de données concernant les filtres à petits plis, principalement utilisés dans l'industrie nucléaire française. Les quelques études menées avec des filtres THE à plis profonds apportent peu de données analytiques sur l'influence de l'humidité durant le colmatage des filtres. En effet, les expériences recensées sont généralement imprécises en termes de conditions opératoires ou de paramètres étudiés. Néanmoins, les travaux menés en air sec et pour les aérosols de combustion mettent en évidence un couplage entre les effets des paramètres vitesse de filtration et granulométrie de l'aérosol.

Les travaux de Gupta *et al.* (1993), effectués sur des filtres THE de géométrie plane en présence d'humidité, ont mis en évidence l'importance de la nature hygroscopique de l'aérosol sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre durant son colmatage. Pour un aérosol non-hygroscopique ou un aérosol hygroscopique à un taux d'humidité relative inférieur à son point de déliquescence, l'accroissement de la perte de charge du filtre est d'autant plus faible que l'humidité de l'air est grande ; pour un aérosol hygroscopique à un taux d'humidité relative supérieur à son point de déliquescence, la perte de charge du filtre augmente de manière exponentielle à partir d'une certaine masse de gouttelettes collectées. Ces résultats constituent une base de données intéressante, mais l'étude sur des filtres à petits plis demeure indispensable puisque ces derniers présentent, durant leur colmatage, une phase de réduction de la surface de filtration qui modifie considérablement l'évolution de leur perte de charge.

L'objectif de ces travaux est de combler le manque de données analytiques sur l'influence de la présence d'humidité durant le colmatage de filtres à petits plis, en termes de perte de charge et d'efficacité. Afin de permettre une meilleure compréhension des phénomènes qui apparaissent pendant un colmatage en présence d'humidité, les travaux expérimentaux ont été menés sur des filtres à petits plis ainsi que sur des filtres de géométrie plane ; deux types d'aérosols, hygroscopique et non-hygroscopique, ont été étudiés.

Le chapitre suivant s'attache à décrire l'ensemble du matériel et la méthode de travail utilisés durant ces travaux.

## CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODE

### I. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAIS

Afin de combler le manque de données analytiques sur le colmatage en présence d'humidité de filtres THE à petits plis, l'IRSN s'est doté du banc d'essais CATFISH (Caractérisation Analytique de la Filtration Sous Humidité ; Artous, 2005). Le banc offre la possibilité de contrôler l'effluent arrivant sur le filtre THE, en termes de débit, de température et d'humidité. Les plages de fonctionnement sont les suivantes :

- la plage de débit s'étend de 15 à 200 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>,
- la plage de température est comprise entre 8 °C et 100 °C,
- la plage d'humidité relative varie de quelques % à la saturation (12 % à 8 °C jusqu'à 76 % à 100 °C).

#### I.1. Schématisation du banc d'essais

Le schéma de principe du banc d'essais CATFISH est représenté sur la figure 2-1.

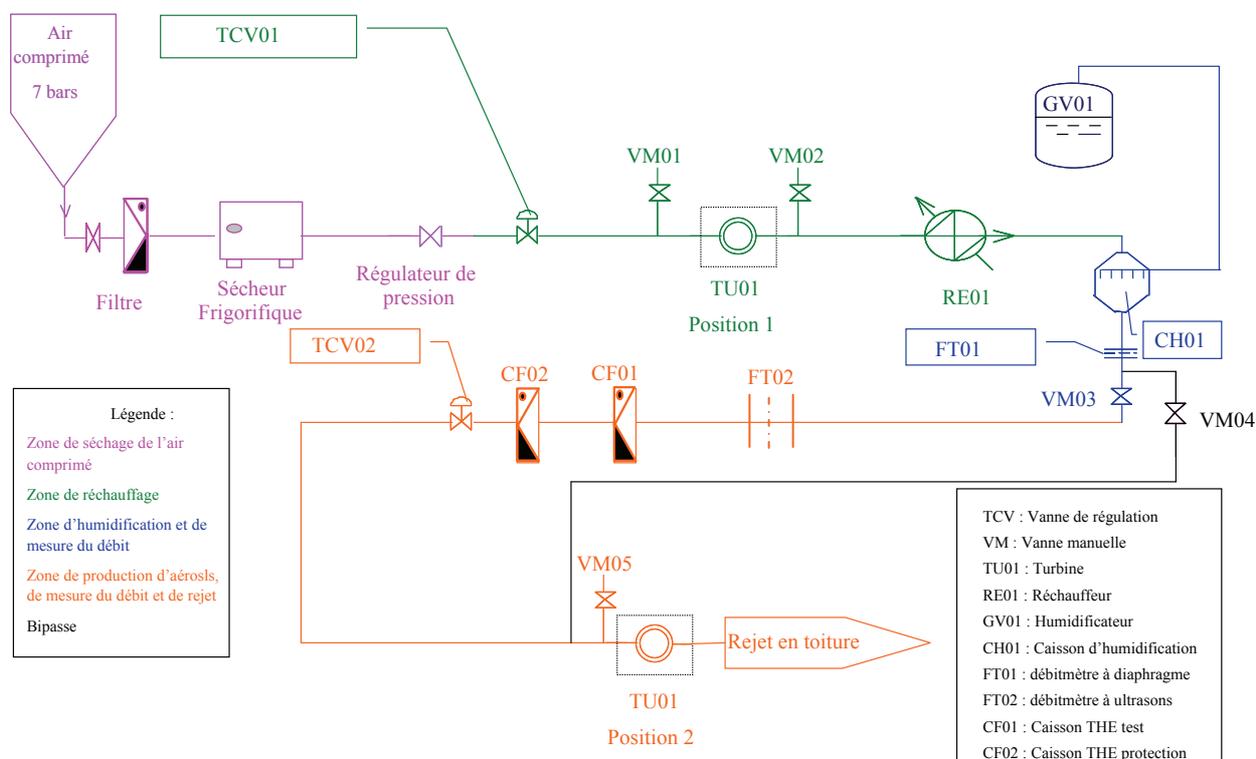


Figure 2-1 : Schéma de principe du banc d'essais CATFISH (Artous, 2005)

## I.2. Production de l'effluent

### I.2.1. Séchage

Tout d'abord, de l'air comprimé, préalablement filtré, arrive au niveau du sécheur frigorifique. Le but est de diminuer la fraction d'eau dans l'air afin d'atteindre un seuil minimal et de pouvoir par la suite maîtriser la teneur en vapeur d'eau dans l'effluent gazeux sur une gamme complète. Le principe de fonctionnement du sécheur frigorifique est illustré sur la figure 2-2. En sortie du sécheur, l'air est à une température de 8 °C et une humidité relative de 12 % et un régulateur abaisse la pression de 7 bar à 1,5 bar.

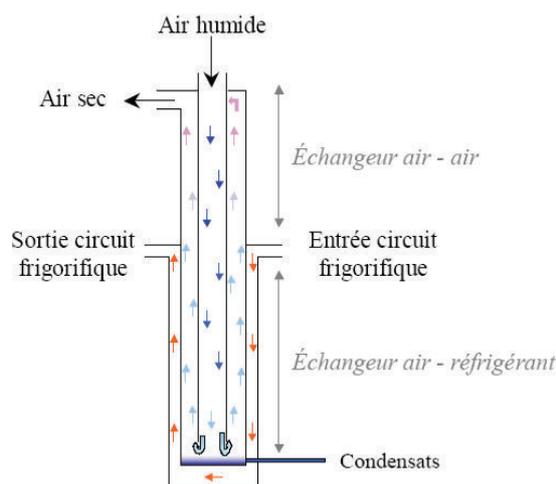


Figure 2-2 : Principe de fonctionnement du sécheur frigorifique

### I.2.2. Réchauffage

L'air comprimé traverse ensuite une vanne de régulation TCV01 qui a pour rôle de maintenir une pression relative nulle à l'entrée du réseau de ventilation. Pour les points de fonctionnement au-delà de 60 °C, la turbine TU01 est placée entre TCV01 et le réchauffeur RE01 (position 1). Le fluide est alors aspiré et refoulé par TU01. Un té, placé en amont de TU01, autorise le fonctionnement sur une plage de débit supérieure à la zone de fonctionnement du sécheur d'air en actionnant la vanne de mise à l'atmosphère VM01. Un té placé en aval surmonté de la vanne de mise à l'atmosphère VM02 permet d'obtenir des débits inférieurs à 80 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> correspondant au débit minimal de la turbine.

L'air passe alors à travers le réchauffeur à résistance, RE01 d'une puissance de 6,5 kW, qui élève la température de l'air en sortie à un maximum de 100 °C.

### I.2.3. Humidification

L'air est ensuite humidifié par la vapeur de l'humidificateur électrique GV01 à l'intérieur du caisson d'humidification CH01. L'utilisation d'une rampe d'injection associée à un humidificateur de vapeur à faible pression permet de couvrir une plage de fonctionnement importante (Cf. figure 2-3). Le réglage de la puissance de chauffe permet d'obtenir un rapport de mélange de 0,6 à 688 g d'eau.(kg d'air sec)<sup>-1</sup> à 100 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Une première longueur droite stabilise l'écoulement et permet une mesure du débit par l'intermédiaire d'un diaphragme FT01. L'air circule alors, soit par le bipasse vers un rejet en toiture, soit sur l'équipement à tester.

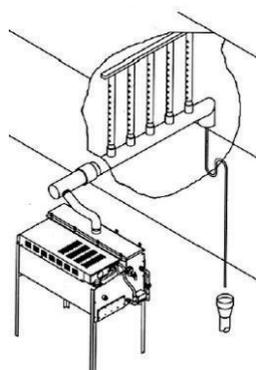


Figure 2-3 : Schéma de l'humidificateur

#### I.2.4. Production d'aérosols

Une seconde longueur droite permet la production d'aérosols dans des conditions de concentrations homogènes dans la section d'essai en amont du filtre, ainsi qu'une mesure du débit de l'effluent par ultrasons FT02. L'air atteint ensuite le caisson de filtration et passe à travers le filtre de test, puis à travers un filtre de protection et une seconde vanne de régulation, TCV02. Celle-ci compense, en s'ouvrant progressivement, l'augmentation de la perte de charge due au colmatage du filtre. Cette vanne de régulation garantit un débit de filtration constant sur le filtre testé. Deux caissons de filtration amovibles de différentes dimensions sont disponibles selon le filtre testé :  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  ou  $150 \times 150 \text{ mm}^2$  ; l'ensemble de la tuyauterie en amont du caisson de filtration est de diamètre 80 mm.

Enfin, lorsque le banc fonctionne à des températures inférieures à  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , l'air passe à travers la turbine TU01 (position 2) et est expulsé en toiture. En amont de TU01, un té avec la vanne manuelle VM05 permet d'obtenir des débits inférieurs à la plage de fonctionnement de la turbine.

#### I.2.5. Calorifugeage et traçage électrique

La présence d'un calorifuge permet de maintenir la température de l'air entre  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  au niveau du filtre.

La mise en place de 5 cordons chauffants, dont la température est régulée de  $10$  à  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , permet d'éviter tout phénomène de condensation au niveau des parois. Chaque cordon peut être réglé indépendamment.

### I.3. Mesures des paramètres caractéristiques de l'effluent

L'instrumentation aéraulique mise en place pour l'étude du comportement des filtres est constituée de capteurs de pression, de température, d'humidité et de mesure du débit.

#### I.3.1. Débit

Un débitmètre à ultrasons, placé en amont du filtre à tester, contrôle en temps réel le débit de filtration. Le principe de fonctionnement de l'appareil est schématisé sur la figure 2-4.

Des signaux acoustiques sont émis et reçus de part et d'autre de la veine gazeuse en A et B et transmis sur la ligne de mesure A - B. Une onde ultrasonore se dirigeant vers l'aval de A vers B se propage plus rapidement qu'une onde se dirigeant à contre courant de B vers A. La différence des temps de propagation  $t_{AB}$  et  $t_{BA}$  est directement proportionnelle à la vitesse moyenne du gaz le long de la ligne de mesure AB.

Le débitmètre à ultrasons installé sur le banc d'essais dispose de deux couples de sondes à ultrasons croisés, soit deux voies de mesure.

De plus, un débitmètre à diaphragme permet la mesure du débit de l'effluent en amont de la zone de bipasse.

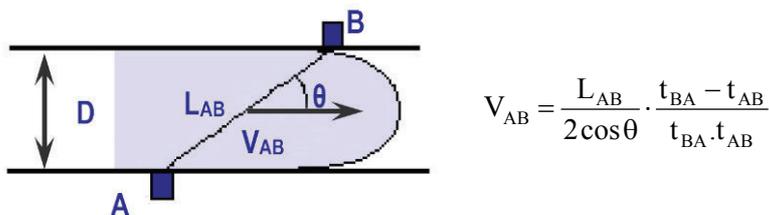


Figure 2–4 : Schéma de principe d'un débitmètre à ultrasons

### I.3.2. Température

La température de l'effluent est mesurée dans les différentes zones caractéristiques du banc d'essais à l'aide de sondes à résistance de platine PT100 de classe A, dont la plage de variation est inférieure à 0,5 °C. La mesure d'une température précise et juste est essentielle pour obtenir une mesure d'humidité dans de bonnes conditions. En effet, l'humidité relative variant de façon exponentielle avec l'augmentation de la température, toute erreur de mesure entraîne alors une variation importante de la valeur d'humidité relative.

### I.3.3. Humidité

La mesure d'humidité s'effectue en fonction du paramètre recherché (température de rosée, humidité relative) et de la plage de fonctionnement du capteur. Le banc d'essais est ainsi équipé de capteurs capacitifs, peu affectés par la présence d'aérosols dans l'effluent gazeux, dont la plage de validité des mesures est comprise entre 10 et 95 % d'humidité relative pour des températures comprises autour de 25 °C. Deux capteurs en particulier sont placés en amont et en aval du filtre testé.

Au-delà de la plage d'utilisation des capteurs capacitifs, un hygromètre à condensation, qui détermine la température de rosée de l'effluent, est employé ; celui-ci ne devant pas être exposé aux aérosols, il est placé en aval du filtre testé.

### I.3.4. Perte de charge

La perte de charge au niveau du filtre testé est enregistrée en continu à l'aide d'un capteur utilisant l'effet piézoélectrique. Le matériau piézoélectrique possède une structure cristalline asymétrique qui permet le déplacement des charges sous l'effet des contraintes de pression. La gamme du capteur utilisé s'étend de 0 à 630 mmCE (soit 0 à environ 610 daPa).

## I.4. Qualification de l'instrumentation aéraulique

La qualification de l'instrumentation, hormis le débitmètre à ultrasons, a été effectuée préalablement par Artous (2005), en particulier en présence d'humidité.

L'évaluation des capteurs de température a été effectuée à l'aide d'un four d'étalonnage. A 50 °C, l'écart enregistré entre la température moyenne des capteurs et la consigne du four est inférieur à 1 % et la plage de variation des sondes n'excède pas 0,5 °C. Les écarts de mesure de température n'entraînent pas de variation d'humidité relative supérieure à 5 %. Les hygromètres capacitifs ont également été qualifiés. L'écart mesuré entre la température de l'hygromètre et une sonde à résistance de platine PT100 positionnée en amont du caisson de filtration ne dépasse pas 1 % ; l'écart entre la valeur d'humidité fournie par les sondes capacitives et l'hygromètre à miroir n'excède pas 5 %. Le contrôle du capteur de pression PT03 situé au niveau du filtre testé a été effectué à l'aide d'un calibrateur de pression 0-150 mbar. L'écart entre la consigne et la valeur mesurée par PT03 reste inférieur à 0,1 % sur toute l'étendue de mesure. Enfin, la qualification de FT01, débitmètre à diaphragme, a été effectuée par traçage gazeux à l'hélium. L'écart entre le débit issu du diaphragme et le débit de référence reste inférieur à 10 % ; il est à noter que l'influence de l'humidité relative et de la température de l'air est intégrée dans la mesure de FT01 à travers la masse volumique de l'air qui est recalculée en fonction des valeurs de ces paramètres.

La qualification du débitmètre à ultrasons a été effectuée durant ces travaux par traçage gazeux à l'hélium. La méthode est détaillée dans l'ANNEXE IV. Les résultats indiquent que l'écart entre la valeur du débit issue du débitmètre à ultrasons et le débit de référence reste inférieur à 10 %. La température de l'air étant de  $25 \pm 2$  °C sur l'ensemble de la gamme de travail, l'influence de l'humidité relative de l'air est négligeable sur la mesure puisque dans cette gamme les propriétés physiques de l'air (masse volumique et viscosité dynamique) évoluent peu (Tsilingiris, 2008).

L'influence de la présence d'aérosols dans le banc d'essais a été étudiée sur la mesure du débit par ultrasons. Les essais ont été effectués en conditions d'air ambiant (HR = 50 % et T = 18 °C) en présence de l'aérosol d'alumine et en plaçant en série, i. e. avec le bipasse fermé, le débitmètre à diaphragme (FT01) et le débitmètre à ultrasons (FT02). Les résultats, présentés dans l'ANNEXE IV, indiquent que la présence de l'aérosol d'alumine n'influe pas sur la mesure du débit par ultrasons. Néanmoins, afin de limiter le dépôt d'aérosol sur les sondes à ultrasons, en particulier en conditions d'air humide, celles-ci sont régulièrement nettoyées.

### I.5. Acquisition des données

Pour assurer l'indépendance entre le matériel d'acquisition et les transmetteurs, le mode de communication en 4-20 mA a été privilégié. En ce qui concerne les modules d'acquisitions, le choix s'est tourné vers les modules de National Instrument avec un langage LABVIEW. La figure 2-5 représente la chaîne de mesure et de contrôle du procédé (Artous, 2005).

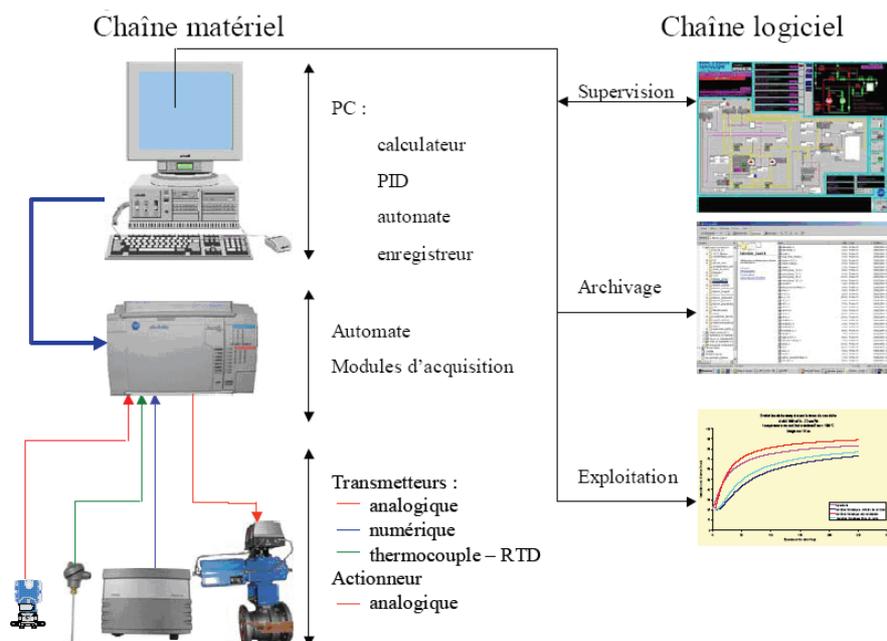


Figure 2-5 : Chaîne de mesure-contrôle du procédé (Artous, 2005)

### Bilan

Cette première partie a permis de décrire le banc d'essais, sur lequel s'est fait l'ensemble des colmatages de filtres durant ces travaux, ainsi que l'instrumentation aéraulique utilisée.

La prochaine partie de ce chapitre présente les différents aérosols mis en œuvre et la métrologie associée.

## II. AEROSOLS UTILISES ET METROLOGIE ASSOCIEE

Trois aérosols différents ont été utilisés durant ces travaux :

- deux aérosols, de nature hygroscopique différente, employés pour colmater les filtres : un aérosol non-hygroscopique d'alumine et un aérosol hygroscopique de chlorure de sodium,
- un aérosol de fluorescéine sodée (appelé également uranine), destiné à la mesure du coefficient d'épuration des filtres plissés selon la norme NFX 44-011.

### II.1. Description des aérosols

#### II.1.1. Aérosol d'alumine

L'aérosol d'alumine est produit à partir d'une poudre utilisée industriellement pour le polissage. Sa composition chimique est indiquée dans le tableau 2-1. La figure 2-6 représente un agrandissement au Microscope Electronique à Balayage (MEB) de la poudre.

Tableau 2-1 : Données fournisseur (AGP) de la composition chimique de la poudre d'alumine utilisée (%)

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Divers
99,20	0,55	0,08	0,05	0,02	0,10

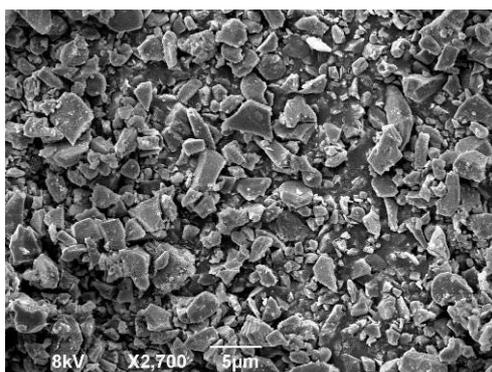


Figure 2-6 : Agrandissement au MEB (×2700) de la poudre d'alumine utilisée

#### II.1.2. Aérosol de chlorure de sodium

L'aérosol de chlorure de sodium est produit à partir de cristaux. Un agrandissement au MEB (×2700) d'un dépôt de particules de chlorure de sodium à la surface d'un filtre plan est présenté sur la figure 2-7.

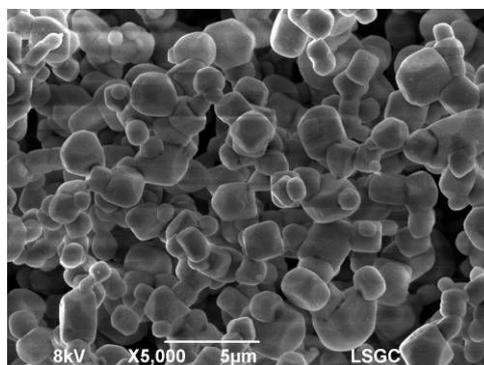


Figure 2-7 : Agrandissement au MEB (×5000) d'un dépôt de particules de chlorure de sodium à la surface d'un filtre plan

La structure du NaCl correspond à deux sous réseaux cubiques à face centrée. Sa solubilité est de  $359 \text{ g.dm}^{-3}$  d'eau et sa masse volumique de  $2165 \text{ kg.m}^{-3}$ . La déliquescence et l'efflorescence des particules de NaCl ont été étudiées dans le paragraphe IV.3.2 du chapitre 1 : pour des particules de diamètres supérieurs à 100 nm et une température de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , l'humidité relative de déliquescence se situe autour 75 % et l'humidité relative d'efflorescence autour de 45 %.

### II.1.3. Aérosol d'uranine

L'aérosol de fluorescéine sodée, également nommée uranine, est produit à partir d'une poudre de formule chimique  $\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{O}_5\text{Na}_2$ . Cette substance émet une lumière réfléchie de fluorescence lorsqu'elle est excitée sous les ultraviolets. Sa masse volumique est de  $1500 \text{ kg.m}^{-3}$ .

L'hygroscopicité de la poudre d'uranine a été étudiée par Pradel et Brion (1970). Selon les auteurs, pour de l'uranine pure (pureté 99,8 %), comme pour l'uranine brute (pureté 98 %), l'état hygrométrique critique correspond à une humidité relative de l'air comprise entre 82 et 85 % pour une température de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ; i. e. qu'à l'équilibre, l'uranine est solide pour des taux d'humidité relative inférieurs, liquide pour des taux d'humidité relative supérieurs.

L'isotherme à  $25^\circ\text{C}$  de sorption de l'eau par un tas de poudre de fluorescéine sodée a été réalisée par le Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, à l'aide d'une balance de sorption (Callé-Chazelet *et al.*, 2008 b). Les résultats indiquent que la prise en masse de l'échantillon est négligeable, inférieure à 3 %, jusqu'à 25 % d'humidité relative pour un échantillon de fluorescéine sodée séchée avant l'essai, et jusqu'à 35 % pour celui maintenu à humidité ambiante avant l'essai. Pour des taux d'humidité relative supérieurs, la prise en masse de l'échantillon augmente considérablement ; elle atteint plus de 20 % dans les deux cas à 50 % d'humidité relative. Puis, au-delà de 70 % d'humidité relative, il y a apparition de liquide à la surface des tas de poudre.

A l'échelle microscopique de l'aérosol, aucune valeur d'humidité relative de déliquescence ou d'efflorescence n'a été recensée ; néanmoins, Pradel et Brion (1970) précisent que l'humidité relative de déliquescence devrait être encore plus élevée puisque la tension de vapeur à la surface de fines gouttelettes est supérieure à celle d'une surface plane.

## II.2. Moyens de production et de caractérisation des aérosols

### II.2.1. Moyens de production

Le choix des systèmes de production des aérosols de colmatage est délicat. En effet, les importantes surfaces de filtration mises en œuvre pour les filtres plissés ont conduit à envisager des systèmes de production d'aérosols à fort débit massique, lorsque cela était possible.

#### a. Aérosol non-hygroscopique d'alumine

L'aérosol d'alumine est produit par dispersion de poudre à l'aide d'un générateur PALAS BEG-1000. Le générateur, qui est alimenté en air comprimé du réseau, est associé à un système d'alimentation de poudre en continu afin de garantir la stabilité dans la production de l'aérosol. Une photographie du générateur est proposée sur la figure 2–8. La poudre est stockée dans un réservoir puis envoyée sur un tapis roulant vers un malaxeur qui l'homogénéise. Enfin, la poudre est aspirée par un phénomène de dépression et éjectée dans la canalisation. Les évolutions de la masse du réservoir et du malaxeur sont enregistrées dans le temps et permettent de suivre la stabilité du débit d'aérosol généré au cours de l'essai.

Les caractéristiques de réglage employées durant les essais (telles que la pression d'alimentation en air comprimé) conduisent à un débit d'air en sortie du générateur de  $5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$  pour un débit massique d'aérosol généré d'environ  $90 \text{ g.h}^{-1}$ .



Figure 2-8 : Générateur par dispersion de poudre PALAS BEG-1000

b. Aérosol hygroscopique de chlorure de sodium et aérosol d'uranine

Les deux aérosols de chlorure de sodium et d'uranine sont générés avec le même type d'appareil. Il s'agit d'un générateur pneumatique, utilisé pour la mesure normalisée du coefficient d'épuration des filtres.

L'aérosol est produit par pulvérisation aqueuse d'une solution de chlorure de sodium ou d'uranine dont la concentration massique est choisie en fonction du diamètre de l'aérosol souhaité selon la formule :

$$d_p = d_g \cdot \sqrt[3]{C_v} \quad (2-1)$$

avec  $d_g$  le diamètre des gouttelettes et  $C_v$  la concentration volumique de la solution.

La buse de pulvérisation est alimentée en air comprimé et comprend huit éjecteurs. La solution est aspirée puis rejetée sous forme de gouttelettes ; les plus grosses d'entre elles sont arrêtées par un pare-gouttes et les autres passent, à très grande vitesse, au travers de deux séparateurs à inertie. Ces éléments ne permettent qu'une faible entrée d'air ; du fait de leur inertie, les plus grosses gouttelettes ne suivent pas la déviation des filets d'air et sont éliminées. De plus, une couche de matériau hydrophile tapisse l'intérieur des séparateurs afin de fixer les résidus de liquide et d'éviter la réémission de gouttelettes sous l'action de la turbulence. Puis, après l'élimination des grosses gouttelettes, l'aérosol liquide est évaporé par dilution avec de l'air sec.

Pour la production de l'aérosol de chlorure de sodium, un des séparateurs à inertie est supprimé afin d'augmenter le débit massique d'aérosol généré, mais au détriment d'un aérosol davantage polydispersé. La concentration massique en chlorure de sodium dans la solution est fixée à  $200 \text{ g.l}^{-1}$  ; pour la production d'uranine, les deux séparateurs à inertie sont utilisés et la solution employée a une concentration massique de  $10 \text{ g.l}^{-1}$  (conformément à la norme NF X 44-011).

Les conditions de fonctionnement, et en particulier de rechargement de la solution, diffèrent en fonction de l'aérosol généré. Pour l'aérosol d'uranine, le réservoir est rempli avec 750 ml de solution d'uranine avant la génération, un ajout de 350 ml est effectué après 4 à 5 h de génération, puis un changement total de la solution est réalisé après les 4 à 5 h suivantes de génération (conformément à la norme NF X 44-011). Pour l'aérosol de NaCl, la durée des colmatages des filtres impose une durée de génération de l'aérosol sans interruption, i. e. sans changement total de la solution (qui entraînerait un arrêt du colmatage), beaucoup plus longue ; un remplissage de 750 à 850 ml est donc effectué avant la génération, puis un ajout de 350 ml après 4 à 6 h de génération est réalisé ; enfin, la génération de l'aérosol est maintenue jusqu'à l'épuisement complet de la solution de NaCl (après environ 20 h de production).

La figure 2-9 représente le schéma de principe et une photographie d'un des deux générateurs pneumatiques.

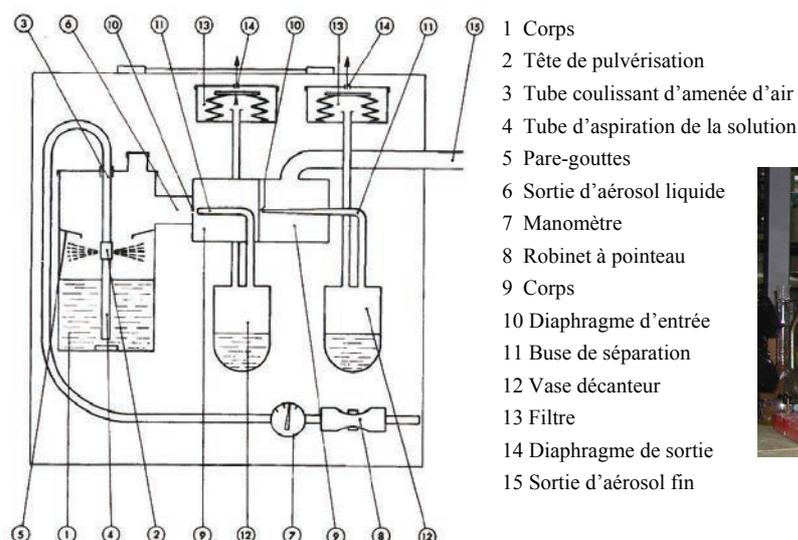


Figure 2-9 : Schéma de principe (à gauche) et photographie (à droite) du générateur pneumatique

Le débit d'air en sortie du générateur est de  $11 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Le débit massique d'aérosol généré dépend du nombre de séparateurs et de la concentration de la solution : pour l'uranine, soit avec les deux séparateurs et une solution de concentration massique de  $10 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ , le débit massique est d'environ  $30 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$  ; pour le chlorure de sodium, soit avec un seul séparateur à inertie et une solution de concentration massique de  $200 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ , le débit d'aérosol généré est d'environ  $1 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ .

En sortie du générateur, l'air contenant l'aérosol de chlorure de sodium a un taux d'humidité relative de 24 %, soit bien inférieur à son humidité relative d'efflorescence (qui est d'environ 45 %).

## II.2.2. Moyens de caractérisation

Les principes de fonctionnement des différents appareils de mesure utilisés durant ces travaux sont présentés dans ce paragraphe.

### a. APS

Un granulomètre TSI APS-3321 (Aerodynamic Particle Sizer) est utilisé pour la caractérisation granulométrique de l'aérosol d'alumine ; étant donné l'important débit massique de l'aérosol, l'APS est muni du système de dilution associé TSI 3302A.

L'APS permet de mesurer en temps réel des diamètres aérodynamiques  $d_{ae}$  de particules compris dans l'intervalle  $0,5 \mu\text{m} < d_{ae} < 20 \mu\text{m}$ . La concentration numérique en entrée ne doit pas excéder  $10^4 \text{ particules} \cdot \text{cm}^{-3}$ . En termes d'humidité relative, la gamme de fonctionnement de l'appareil s'étend de 0 à 90 %. Son utilisation en présence d'humidité a été éprouvée dans la littérature par Leinert et Wiedensohler (2007) pour l'évaluation du facteur de croissance\* de particules de sels inorganiques.

Le principe de fonctionnement est décrit par Renoux et Boulaud (1998). En pénétrant dans l'APS grâce à une pompe interne, l'air porteur de particules est fortement accéléré en passant à travers un petit orifice. Du fait de leur inertie, caractérisée par leur temps de relaxation†  $\tau_p$ , les particules vont mettre un certain temps avant d'ajuster leur vitesse à celle du fluide porteur. Ce retard à l'ajustement dépend directement de  $\tau_p$  et donc de  $d_{ae}^2$ . Ainsi,  $d_{ae}$  peut être déterminé en mesurant la vitesse de chaque particule juste après l'orifice, à l'aide d'un faisceau laser dédoublé.

\* Le facteur de croissance correspond au rapport entre la valeur du diamètre de l'aérosol en air humide et sa valeur en air sec.

† Le temps de relaxation a pour expression  $\tau_p = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot C_u(d_p)}{18\mu}$ .

En passant au travers de ces faisceaux, chaque particule produit deux impulsions lumineuses, converties en impulsions électriques par un photomultiplicateur. Le temps entre deux impulsions est mesuré par une horloge interne : il s'agit du temps de vol de la particule qui permet de remonter à son diamètre aérodynamique.

La figure 2–10 représente le schéma de principe de l'APS et une photographie de l'APS muni de son système de dilution.

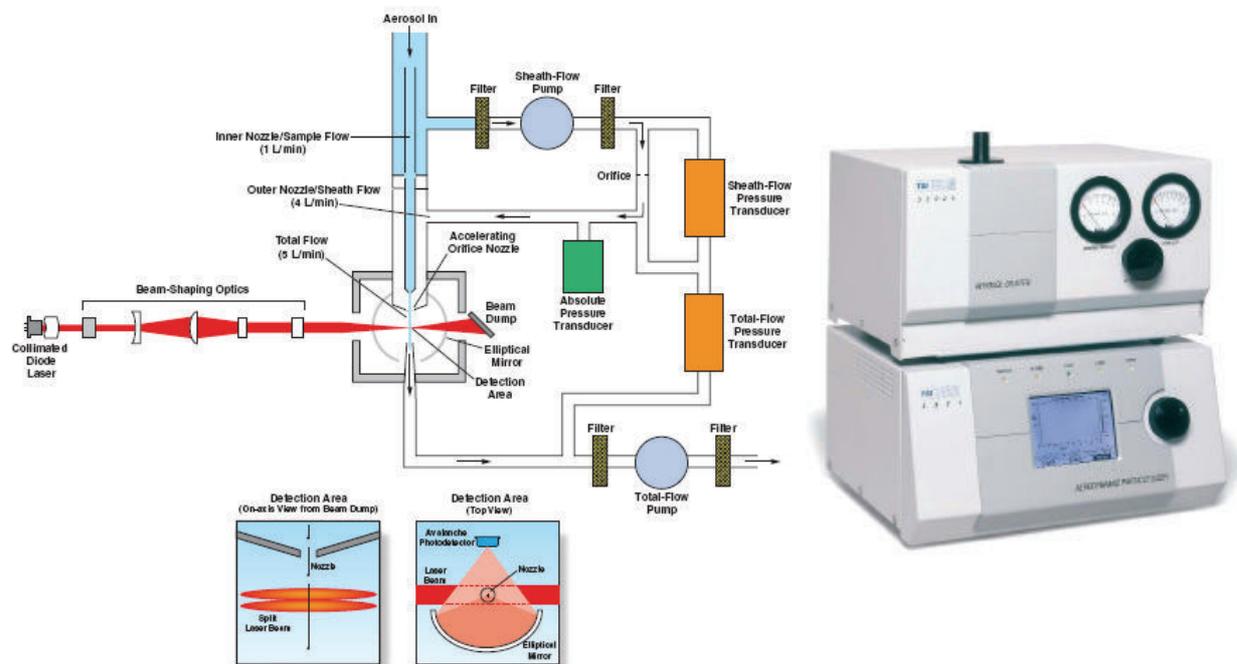


Figure 2–10 : Schéma de principe (à gauche) et photographie (à droite) de l'APS

## b. SMPS

Un granulomètre GRIMM SMPS 5.403 (Scanning Mobility Particle Sizer) est utilisé pour la caractérisation granulométrique des aérosols de chlorure de sodium et d'uranine. Son principe de fonctionnement repose sur l'analyse de la mobilité électrique des particules. Il consiste en un analyseur de mobilité électrique (ou Differential Mobility Analyzer, DMA) relié à un compteur à noyau de condensation (ou Condensation Particle Counter, CPC) placé en série.

Le SMPS permet de mesurer en temps réel des diamètres de mobilité électrique  $d_B$  de particules compris dans l'intervalle  $0,01 \mu\text{m} < d_B < 1 \mu\text{m}$ . En termes d'humidité relative, la gamme de fonctionnement s'étend de 0 à 95 %.

L'aérosol prélevé passe tout d'abord par un impacteur d'entrée. Il s'agit d'éliminer les particules de taille trop importante par rapport à la gamme de mesure du DMA. Les particules sont ensuite chargées par un champ d'ions généré par un chargeur bipolaire contenant une source radioactive. Les particules acquièrent des charges positives ou négatives en fonction de leurs collisions avec les ions produits. L'aérosol tend vers une répartition de charges conforme à l'équilibre de Boltzmann. A la sortie du chargeur, l'ensemble des particules est globalement neutre et leur distribution de charge est connue. Elles sont ensuite introduites dans une colonne de classification électrostatique où est appliqué un champ électrique qui influence la trajectoire des particules chargées. C'est dans cette partie qu'est sélectionnée la taille désirée de particules puisqu'il existe une relation directe entre le champ électrique imposé dans la colonne et le diamètre des particules qui seront sélectionnées. Selon la valeur de la tension appliquée à la colonne, seules les particules ayant une mobilité électrique donnée auront la trajectoire correcte pour sortir de la colonne et donc être sélectionnées. Elles sont ensuite envoyées au CPC qui les compte. L'application successive de différentes tensions sur la colonne permet la sélection consécutive de particules de différentes mobilités, donc de différentes tailles, dont la concentration est déterminée simultanément par le compteur. Cela permet ainsi d'établir la distribution granulométrique en nombre de l'aérosol prélevé.

Les particules classées par gamme de taille sont envoyées vers le CPC. Elles passent au-dessus d'une cuve de butanol chauffée. Les vapeurs saturant le flux d'aérosol. L'ensemble est dirigé vers un tube condenseur : les vapeurs se refroidissent, deviennent sursaturées et se condensent autour de chaque particule afin de former de grosses gouttelettes de taille constante de l'ordre de  $10\ \mu\text{m}$ . Cela permet un comptage optique des particules (par diffusion) qui est indépendant de leur taille initiale et de leurs propriétés optiques.

La figure 2–11 représente le schéma de principe et une photographie du SMPS utilisé.

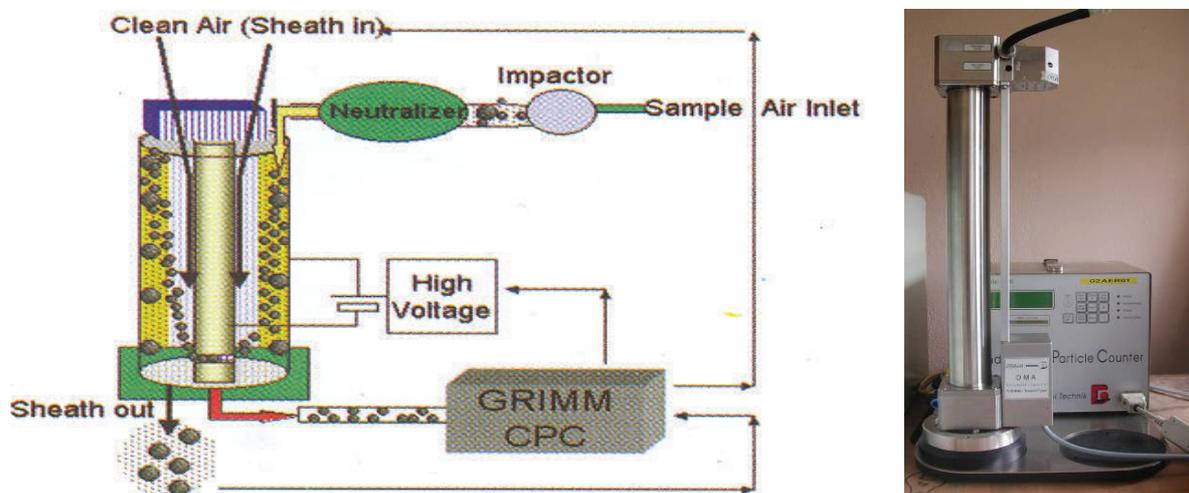


Figure 2–11 : Schéma de principe (à gauche) et photographie (à droite) du SMPS

L'utilisation du SMPS pour la mesure du facteur de croissance d'aérosols a été étudiée dans la littérature, notamment par Ristovski et *al.* (1998). Les auteurs ont testé l'influence du temps de résidence dans le classifieur sur la croissance d'un aérosol de chlorure de sodium, formé de particules de  $50\ \text{nm}$  de diamètre en air sec ; les auteurs ont montré que le débit doit être fixé à  $3\ \text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ , correspondant à un temps de séjour de  $7,4\ \text{s}$ , pour que l'aérosol soit à l'équilibre et que la mesure soit correcte.

### c. Néphélomètre

Un néphélomètre Thermo DataRAM 4, représenté en photographie sur la figure 2–12, est utilisé pour caractériser et enregistrer en temps réel les évolutions de la concentration massique en particules durant les colmatages de filtres. Le principe de fonctionnement consiste à mesurer la quantité de lumière diffusée par un flux de particules, à un angle donné par rapport au faisceau incident ( $60^\circ$ ), d'intensité lumineuse connue. La quantité de lumière diffusée est corrélée à l'intensité incidente et à la concentration numérique de particules. En supposant les particules sphériques et de masses volumiques uniformes, l'appareil peut donc déterminer la concentration massique des aérosols.

Le modèle utilisé permet de mesurer une large gamme de concentrations massiques, comprises entre  $0,1\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  et  $400\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Il est à noter qu'au cours de ces travaux, le néphélomètre est utilisé pour suivre des évolutions de concentration au cours du temps, et non pour donner une valeur absolue de ces dernières ; de ce fait, il n'a pas été procédé à un étalonnage de l'appareil pour les différents aérosols.



Figure 2–12 : Photographie du néphélomètre

#### d. Malvern

L'analyse granulométrique fournie par l'APS de l'aérosol d'alumine a été complétée par des résultats effectués par le LSGC à partir d'un granulomètre Mastersizer Malvern.

Le granulomètre Malvern est constitué d'une source de lumière monochromatique de longueur d'onde égale à 750 nm (source laser). L'aérosol d'alumine est dispersé dans l'eau. Le fluide chargé en particules circule dans l'appareil et passe devant le faisceau laser. Les particules, assimilées à des sphères, modifient le parcours de la lumière : les grosses particules engendrent des rayons diffractés de faible incidence, tandis que les plus petites engendrent des rayons diffractés de forte incidence. Tous les rayons diffractés ayant la même incidence sont ensuite concentrés en un même point, sur le même détecteur, par l'intermédiaire de lentilles de Fourier. Ainsi, à chaque détecteur correspond un pic d'intensité caractéristique d'une seule et même taille de particules, dont l'intensité est fonction de la concentration en particules. Un logiciel informatique traite ensuite l'ensemble des données et fournit la distribution granulométrique de l'aérosol en diamètres équivalents en volume.

### II.3. Caractérisation des aérosols produits

#### II.3.1. Diamètres caractéristiques des particules

Une distribution granulométrique est caractérisée par deux paramètres : le premier permet de centrer la distribution et le second renseigne sur la dispersion de la distribution autour du point de centrage. Pour cette étude, les paramètres utilisés pour caractériser les distributions granulométriques des aérosols étudiés, en nombre de particules (indice n) ou en masse (indice m), sont les suivants :

- diamètre moyen  $\bar{d}$ ,
- diamètre médian  $\tilde{d}$ ,
- écart-type géométrique  $\sigma_g$ .

Les expressions statistiques de ces paramètres sont fournies dans l'ANNEXE V.

Le plus souvent, les aérosols n'ont pas une forme idéale ; il faut alors faire appel à des diamètres équivalents pour les caractériser. Les différents diamètres utilisés durant cette étude sont :

- le diamètre aérodynamique  $d_{ae}$  qui est le diamètre d'une sphère ayant la même vitesse de chute que la particule, et une masse spécifique égale à  $1 \text{ g.cm}^{-3}$  ;
- le diamètre de mobilité électrique  $d_B$  qui est le diamètre de la sphère possédant la même mobilité électrique que la particule ;
- le diamètre équivalent en volume  $d_{ev}$  qui est le diamètre de la sphère possédant le même volume total que la particule. Si la particule n'est pas poreuse, le diamètre équivalent en volume correspond au diamètre équivalent en masse.

Ces diamètres équivalents permettent ainsi de ramener tout aérosol à une particule sphérique. Cependant, la notion de facteur de forme est nécessaire afin de prendre en compte les écarts entre la forme réelle de l'aérosol et sa représentation sphérique.

#### II.3.2. Distribution granulométrique des aérosols en air sec

Les mesures granulométriques des aérosols ont été faites, dans la plupart des cas, par prélèvement direct de l'aérosol dans le banc d'essais par le granulomètre. Ainsi, en s'assurant de l'isocinétisme du prélèvement (Cf. ANNEXE VI), les distributions obtenues sont considérées comme représentatives de celles rencontrées en amont du filtre durant les colmatages.

##### a. Aérosol d'alumine

L'aérosol d'alumine n'étant pas de forme sphérique, sa distribution granulométrique a été caractérisée à l'aide de deux granulomètres : un granulomètre Malvern qui fournit un diamètre équivalent en volume  $d_{ev}$ , et le granulomètre APS qui fournit un diamètre aérodynamique  $d_{ae}$ .

La distribution obtenue avec le granulomètre Malvern a été effectuée au LSGC. La comparaison des deux courbes granulométriques en masse a permis de déterminer le facteur de forme dynamique  $\chi$  pour chaque classe granulométrique ;  $\chi$  est défini par le rapport entre la force de résistance agissant sur la particule considérée et la force de résistance agissant sur la particule sphérique de même volume que la particule considérée, toutes deux ayant la même vitesse relative par rapport au gaz porteur.

La méthode de calcul utilisée, selon Witschger *et al.* (2002), consiste à faire correspondre à chaque seuil droit du canal de la distribution obtenue à l'aide du Malvern une probabilité cumulée et un diamètre  $d_{ev}$  et à rechercher sur la distribution obtenue avec l'APS à quel  $d_{ae}$  correspond cette même probabilité. La méthode de calcul est décrite sur la figure 2-13. A partir de la masse volumique  $\rho_p$  de la particule, le facteur de forme dynamique  $\chi$  est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$\chi = \frac{\rho_p \cdot d_{ev}^2 \cdot Cu(d_{ev})}{\rho_0 \cdot d_{ae}^2 \cdot Cu(d_{ae})} \quad (2-2)$$

avec  $\rho_0 = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$

La procédure de calcul est réitérée pour chaque canal droit de la distribution en  $d_{ev}$  pour obtenir ainsi l'évolution du facteur de forme dynamique  $\chi$  en fonction du diamètre  $d_{ev}$  ou  $d_{ae}$  des particules qui constituent l'aérosol. Les résultats sont présentés dans l'ANNEXE VII. Le nombre de canaux de mesure étant différent entre les deux techniques choisies, un traitement des données est nécessaire pour l'analyse des résultats issus de l'APS.

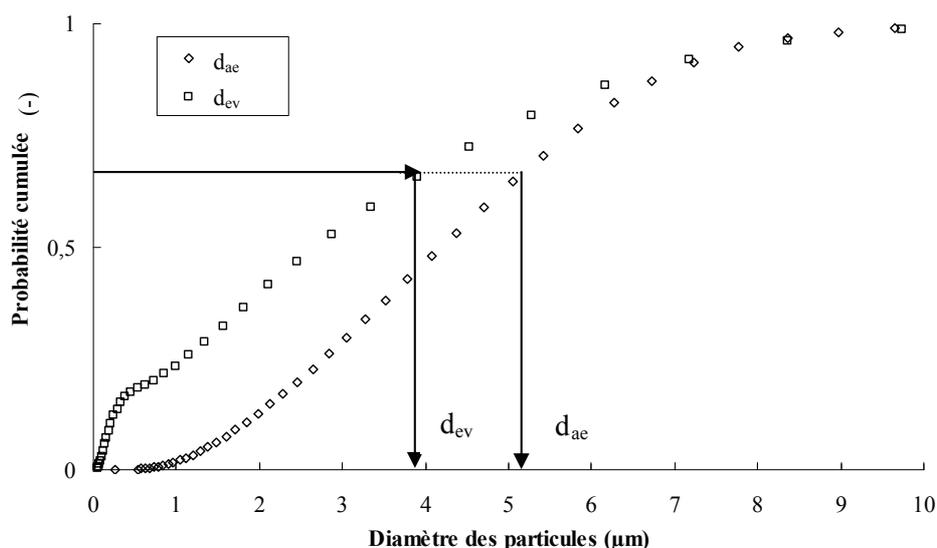


Figure 2-13 : Description de la méthode employée pour la détermination du facteur de forme dynamique des particules d'alumine

#### b. Aérosol de chlorure de sodium

L'aérosol de chlorure de sodium est de forme cubique ; ainsi, son facteur de forme dynamique  $\chi$  est pris égal à 1,08 quelle que soit la taille des particules (Renoux et Boulaud, 1998).

Le SMPS fournissant un diamètre de mobilité électrique  $d_B$ , la distribution en diamètre équivalent en volume  $d_{ev}$  a été calculée à partir de la relation :

$$d_{ev} = d_B \cdot \frac{Cu(d_{ev})}{\chi \cdot Cu(d_B)} \quad (2-3)$$

### c. Aérosol d'uranine

Pour l'aérosol d'uranine, l'utilisation du générateur pneumatique dans les conditions décrites dans la norme NF X 44-011 conduit à un aérosol de diamètre aérodynamique médian massique d'environ 0,18  $\mu\text{m}$ . La distribution de l'aérosol a été déterminée dans le banc d'essais selon la même méthode que l'aérosol de chlorure de sodium afin de s'assurer du bon fonctionnement du générateur.

Dans le cas de l'uranine, le facteur de forme dynamique est pris égal à 1 ; ainsi, selon la relation (2-3), les diamètres  $d_B$  et  $d_{ev}$  sont identiques.

### d. Synthèse des résultats

Les distributions granulométriques en diamètres équivalents en volume des aérosols étudiés sont présentées dans l'ANNEXE VIII. La représentation sous forme de droites de Henry (Renoux et Boulaud, 1998) indique que les lois de distribution des aérosols de chlorure de sodium et d'uranine peuvent être considérées comme log normale ; l'aérosol d'alumine suit une loi de distribution bimodale (qui sera néanmoins caractérisée avec un écart-type géométrique).

Le tableau 2-2 regroupe quelques valeurs caractéristiques des distributions granulométriques des aérosols étudiés en air sec ( $5\% < HR < 15\%$ ,  $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ ), calculées à partir des données brutes des granulomètres et des relations (2-2) et (2-3) : le diamètre équivalent en volume moyen en nombre  $\bar{d}_{ev,n}$ , le diamètre équivalent en volume médian en masse  $\tilde{d}_{ev,m}$ , le facteur de forme dynamique  $\chi$  associé à cette classe granulométrique, le diamètre aérodynamique médian massique  $\tilde{d}_{ae,m}$  (qui est souvent employé dans le domaine de la filtration), et enfin, l'écart-type géométrique  $\sigma_{g,m}$  des distributions en masse. En considérant que les particules sont non-poreuses,  $d_{ev}$  peut être assimilé au diamètre équivalent en masse.

Tableau 2-2 : Grandeurs caractéristiques des distributions granulométriques des aérosols étudiés en air sec

Aérosol	$\bar{d}_{ev,n}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\tilde{d}_{ev,m}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\chi$ pour $\tilde{d}_{ev,m}$ (-)	$\tilde{d}_{ae,m}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_{g,m}$ (-)
Alumine	2,38	2,69	1,62	4,19	1,7
Chlorure de sodium	0,10	0,41	1,08	0,61	2,1
Uranine	0,06	0,14	1,00	0,18	1,6

Le dépôt des aérosols dans les lignes de prélèvement a été évalué à l'aide des modèles de dépôt implémentés dans le code de calcul SYLVIA développé par l'IRSN (Mélis *et al.*, 2008) ; les résultats ont montré que le dépôt reste inférieur à 2 % pour les trois aérosols étudiés.

## II.3.3. Stabilité de la production des aérosols dans le temps

### a. Aérosol d'alumine

La stabilité du débit massique d'aérosol d'alumine émis a été étudiée, d'une part à l'aide de l'évolution de la masse de poudre dans le générateur (malaxeur), d'autre part à l'aide de l'évolution du signal donné par le néphélomètre, signal proportionnel à la concentration d'aérosols.

Les mesures avec le néphélomètre ont été réalisées en amont du filtre et en conditions d'air sec ( $5\% < HR < 15\%$ ,  $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ) ; les enregistrements ont été réalisés pendant une durée de 30 min de production, représentative d'un colmatage de filtre.

La figure 2-14, qui représente l'évolution de la masse de poudre dans le générateur, indique que la génération d'aérosol est stable dans le temps. De même, la figure 2-15, qui représente l'enregistrement du signal donné par le néphélomètre durant la génération d'alumine, indique que la concentration massique d'alumine en amont du filtre est également stable dans le temps. En effet, 95 % des valeurs se situent dans l'intervalle  $C_{moy} \pm 15\%$ . Ces résultats permettent de valider l'hypothèse selon laquelle la masse d'aérosol sur le filtre se dépose de façon linéaire dans le temps. Etant données la faible durée moyenne de génération et la stabilité de cette dernière, la stabilité du diamètre de l'aérosol d'alumine n'a pas été étudiée dans le temps.

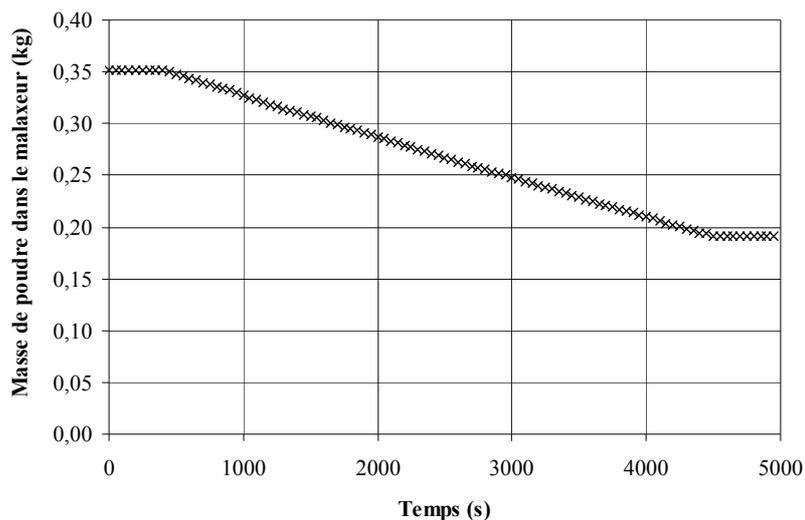


Figure 2–14 : Etude de l'évolution de la masse de poudre d'alumine dans le générateur

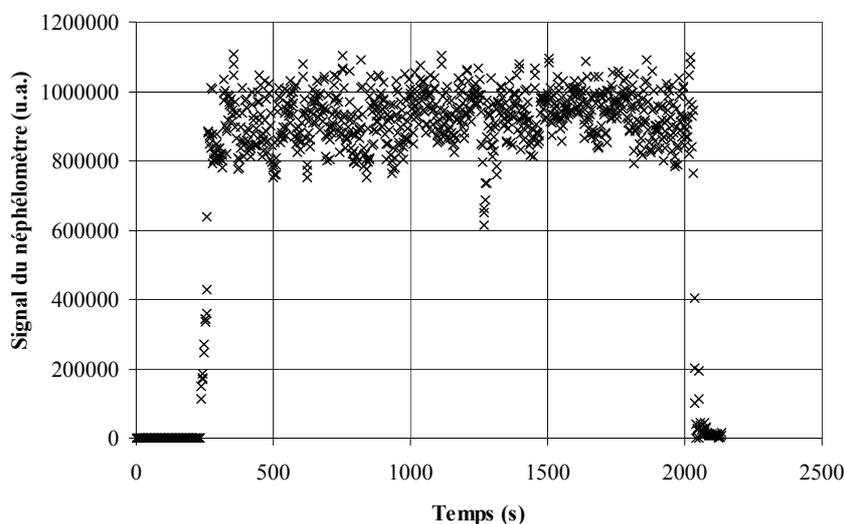


Figure 2–15 : Etude de la stabilité du débit généré d'aérosol d'alumine avec le néphélomètre

#### b. Aérosol de chlorure de sodium

La stabilité du débit massique de l'aérosol de chlorure de sodium a été étudiée uniquement à l'aide de l'évolution du signal donné par le néphélomètre.

Pour l'aérosol de chlorure de sodium, le débit généré étant beaucoup plus faible que celui de l'alumine, le colmatage est beaucoup plus long à atteindre. La figure 2–16 représente l'enregistrement du signal du néphélomètre, qui est proportionnel à la concentration massique d'aérosol généré pendant environ 20 h. Les résultats indiquent que la concentration massique en aérosol en amont du filtre n'est pas stable au cours du temps. Ainsi, pour l'aérosol de chlorure de sodium, le néphélomètre sera utilisé durant chaque colmatage afin de déterminer l'évolution de la masse déposée sur le filtre en fonction du temps.

Les résultats révèlent également une augmentation du débit massique généré, correspondant à un enrichissement de la solution, suivie d'une diminution qui peut être attribuée à une baisse du niveau de la solution dans le réservoir. La stabilité du diamètre de l'aérosol de chlorure de sodium a ainsi été étudiée en fonction du temps dans les mêmes conditions de génération à l'aide du SMPS. Les résultats, présentés dans le tableau 2–3, indiquent que le diamètre moyen massique de mobilité électrique de l'aérosol évolue peu ; en effet, l'écart des diamètres entre le début de la génération et après 20 h ne dépasse pas 10 %.

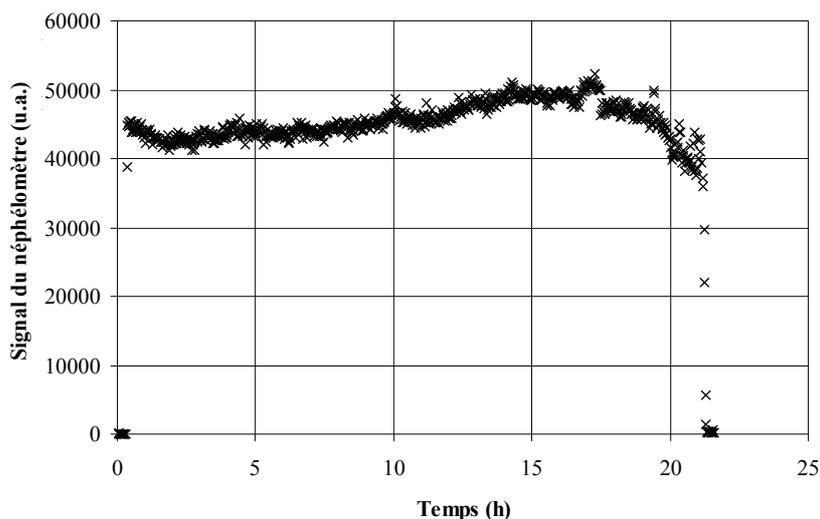


Figure 2-16 : Etude de la stabilité du débit généré d'aérosol de chlorure de sodium avec le SMPS

Tableau 2-3 : Etude de la stabilité du diamètre de l'aérosol de chlorure de sodium dans le temps

Temps (h)	0	0,5	1,0	2,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	15	20
$\bar{d}_{B,m}$ (nm)	405,6	381,2	414,0	437,2	424,1	418,2	420,0	422,1	437,4	422,6	421,0	421,5	434,8	431,3	429,5	435,2
Ecart (%)	-	-6,02	2,07	7,79	4,56	3,11	3,55	4,07	7,84	4,19	3,80	3,92	7,20	6,34	5,89	7,30

L'écart est déterminé selon la relation :

$$\text{Ecart} = \frac{\bar{d}_{B,n}(t) - \bar{d}_{B,n}(t_0)}{\bar{d}_{B,n}(t_0)} \quad (2-4)$$

### c. Aérosol d'uranine

Pour l'aérosol d'uranine, le générateur pneumatique est utilisé dans les conditions décrites dans la norme NFX 44-011 ; ainsi, le débit d'aérosol généré est stable durant les 4 à 5 h de génération maximales requises pour la mesure du coefficient d'épuration d'un filtre, comme le confirment les résultats de Mocho (2007).

## II.3.4. Qualification de la mesure en présence d'humidité

### a. APS

La ligne de prélèvement de l'APS a été qualifiée durant ces travaux afin de s'assurer de l'absence de condensation de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes durant les mesures. Ainsi, des mesures à l'APS (muni de son système de dilution) de la concentration massique en particules dans le banc d'essais, sans génération d'aérosol, ont été effectuées à différents taux d'humidité. Les résultats sont présentés dans le tableau 2-4.

Tableau 2-4 : Qualification de la ligne de prélèvement de l'APS sous humidité

$\bar{C}_m$ (mg.m <sup>-3</sup> )	7,03 ± 0,02	6,85 ± 0,05	6,55 ± 0,06
HR (%)	7	55	90
Ecart (%)	-	- 2,56	- 6,83

avec  $\bar{C}$  la concentration moyenne mesurée par le granulomètre en amont du filtre sans génération d'aérosol ; l'écart est évalué entre la valeur moyenne enregistrée en air sec  $\bar{C}_{\text{sec}}$  et la valeur moyenne enregistrée en air humide  $\bar{C}_{\text{humide}}$ , selon la relation :

$$\text{Ecart} = \frac{\bar{C}_{\text{humide}} - \bar{C}_{\text{sec}}}{\bar{C}_{\text{sec}}} \quad (2-5)$$

Chaque mesure a été reproduite trois fois ; ainsi, les incertitudes associées aux valeurs de concentration correspondent aux intervalles de confiance à 95 %.

Il apparaît que l'écart entre la concentration moyenne correspondant au bruit de fond, mesurée en air sec, et la concentration moyenne mesurée en air humide ne dépasse pas 10 % pour les deux essais effectués à 7 et 90 % d'humidité relative. Ceci démontre l'absence de condensation de la vapeur d'eau sur la ligne de prélèvement de l'aérosol.

#### b. SMPS

La ligne de prélèvement du SMPS, tout comme celle de l'APS, a été qualifiée durant ces travaux. Ainsi, des mesures de la concentration en particules dans le banc d'essais, sans génération d'aérosol, ont été effectuées à différents taux d'humidité par le SMPS.

Les résultats, présentés dans le tableau 2-5, indiquent que l'écart entre la concentration moyenne correspondant au bruit de fond, mesurée en air sec, et la concentration massique moyenne mesurée en air humide ne dépasse pas 5 % sur toute la gamme de mesure comprise entre 30 et 95 % d'humidité relative. Comme pour l'APS, ceci démontre l'absence de condensation de la vapeur d'eau sur la ligne de prélèvement de l'aérosol.

Tableau 2-5 : Qualification de la ligne de prélèvement du SMPS sous humidité

$\bar{C}_m$ (mg.m <sup>-3</sup> )	0,063 ± 0,005	0,063 ± 0,014	0,060 ± 0,012	0,065 ± 0,017	0,060 ± 0,015
HR (%)	5	30	60	70	95
Ecart (%)	-	0	- 4,76	3,17	- 4,76

### II.3.5. Caractérisation granulométrique des aérosols sous humidité

#### a. Aérosol non-hygroscopique d'alumine

L'aérosol d'alumine a été caractérisé pour différents taux d'humidité relative de l'air avec l'APS muni de son système de dilution. Le tableau 2-6 regroupe les différents résultats obtenus : le diamètre aérodynamique moyen en nombre  $\bar{d}_{\text{ae,n}}$  mesuré par l'APS et le facteur de croissance  $g_c$  associé (correspondant au rapport entre la valeur du diamètre de l'aérosol en air humide et sa valeur en air sec), le diamètre aérodynamique médian massique  $\tilde{d}_{\text{ae,m}}$ , le diamètre équivalent en volume médian massique  $\tilde{d}_{\text{ev,m}}$  calculé avec la relation (2-2) et l'écart-type géométrique  $\sigma_g$  associé et enfin, la concentration numérique en particules  $C_n$  fournie par l'APS (en sortie du système de dilution).

Les diamètres équivalents en volume sont calculés en faisant l'hypothèse que le facteur de forme dynamique  $\chi$  pour chaque classe granulométrique de l'aérosol est le même en air sec qu'en air humide. L'évolution du facteur de croissance est représentée sur la figure 2-17.

Tableau 2-6 : Caractérisation granulométrique de l'aérosol d'alumine sous humidité

HR (%)	$\bar{d}_{\text{ae,n}}$ (μm)	$g_c$ (-)	$\tilde{d}_{\text{ae,m}}$ (μm)	$\tilde{d}_{\text{ev,m}}$ (μm)	$\sigma_g$ (-)	$C_n$ (×10 <sup>3</sup> part.m <sup>-3</sup> )
7	1,52 ± 0,13	1,00 ± 0,17	4,2 ± 0,2	2,7 ± 0,1	1,7	68,6 ± 11,0
55	1,55 ± 0,13	1,00 ± 0,17	4,2 ± 0,3	2,7 ± 0,2	1,7	60,8 ± 0,3
90	1,47 ± 0,07	0,93 ± 0,12	3,9 ± 0,2	2,5 ± 0,1	1,8	60,1 ± 5,2

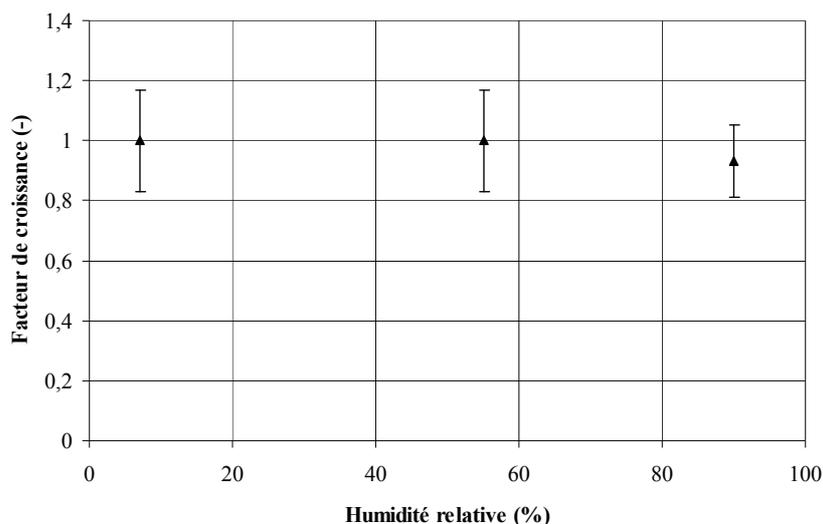


Figure 2-17 : Evolution du facteur de croissance de l'aérosol d'alumine en fonction de l'humidité relative de l'air

Les incertitudes associées aux valeurs de diamètres et de concentration traduisent la dispersion des résultats ; elles correspondent à l'intervalle de confiance à 95 %.

Les résultats en masse montrent un léger rétrécissement du diamètre des particules à 90 % d'humidité relative ; ceci est moins visible en considérant les distributions granulométriques en nombre de particules, ce qui signifie que ce sont les plus grosses particules constituant l'aérosol qui sont impliquées dans ce rétrécissement. Ebert *et al.* (2002) et Mikhailov *et al.* (2001) ont également observé un rétrécissement du même type avec des particules de suies et Weingartner *et al.* (1995) avec du carbone. Plusieurs explications peuvent être avancées pour expliquer cette diminution du diamètre :

- il est possible qu'une partie de la vapeur d'eau s'adsorbe à la surface des particules et modifie ainsi leur facteur de forme,
- les résultats indiquent que la concentration en aérosol mesurée au cours des essais par l'APS diminue lorsque l'humidité relative de l'air augmente ; en effet, l'écart entre la concentration moyenne en air sec et la concentration moyenne à 90 % d'humidité relative est de - 12,39 %. Ainsi, l'aérosol étant polydispersé, il est possible que les plus grosses particules se déposent prioritairement dans le banc d'essais, modifiant de ce fait la distribution granulométrique de l'aérosol.

#### b. Aérosol hygroscopique de chlorure de sodium

##### Distribution granulométrique

L'aérosol de chlorure de sodium a été caractérisé pour différents taux d'humidité relative de l'air avec le SMPS. Le tableau 2-7 regroupe les différents résultats obtenus : le diamètre de mobilité électrique moyen en nombre  $\bar{d}_{B,n}$  mesuré par le SMPS et le facteur de croissance  $g_c$  associé, le diamètre équivalent en volume médian massique  $\tilde{d}_{ev,m}$  calculé avec la relation (2-3) et l'écart-type géométrique  $\sigma_g$  associé, le diamètre aérodynamique médian massique  $\tilde{d}_{ae,m}$  calculé avec la relation (2-2) et enfin, la concentration numérique  $C_n$  en particules fournie par le SMPS.

Pour les calculs, le facteur de forme dynamique  $\chi$  des particules est pris égal à 1,08 pour les taux d'humidité relative inférieurs à 75 % (Renoux et Boulaud, 1998), et égal à 1 pour les taux d'humidité relative supérieurs à 75 %. L'évolution du facteur de croissance est représentée sur la figure 2-18.

Tableau 2-7 : Caractérisation granulométrique de l'aérosol de chlorure de sodium sous humidité

HR (%)	$\bar{d}_{B,n}$ (nm)	$g_c$ (-)	$\tilde{d}_{ev,m}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_g$ (-)	$\tilde{d}_{ae,m}$ ( $\mu\text{m}$ )	$C_n$ ( $\times 10^6$ part.cm <sup>-3</sup> )
5	78 $\pm$ 6	1,00 $\pm$ 0,15	0,41 $\pm$ 0,03	2,1	0,61 $\pm$ 0,04	2,61 $\pm$ 0,52
20	75	0,96 $\pm$ 0,17	0,38	2,0	0,57	2,55
35	67	0,86 $\pm$ 0,15	0,47	2,0	0,69	2,57
50	71	0,91 $\pm$ 0,16	0,33	2,0	0,50	2,55
55	70 $\pm$ 4	0,90 $\pm$ 0,12	0,31 $\pm$ 0,04	2,0	0,47 $\pm$ 0,06	2,56 $\pm$ 0,03
60	67	0,86 $\pm$ 0,15	0,41	2,0	0,61	2,55
70	65	0,83 $\pm$ 0,15	0,39	2,0	0,58	2,32
87	91 $\pm$ 3	1,17 $\pm$ 0,13	0,28 $\pm$ 0,04	1,9	0,37 $\pm$ 0,05*	2,96 $\pm$ 0,83

Les incertitudes associées aux valeurs traduisent la dispersion des résultats lorsque ceux-ci ont été répétés ; elles correspondent à l'intervalle de confiance à 95 %. Pour le calcul de l'incertitude sur le facteur de croissance, l'incertitude associée aux valeurs de  $\bar{d}_{B,n}$  n'ayant pas été reproduites est prise égale à 10 %, valeur maximale des incertitudes correspondant aux valeurs reproduites.

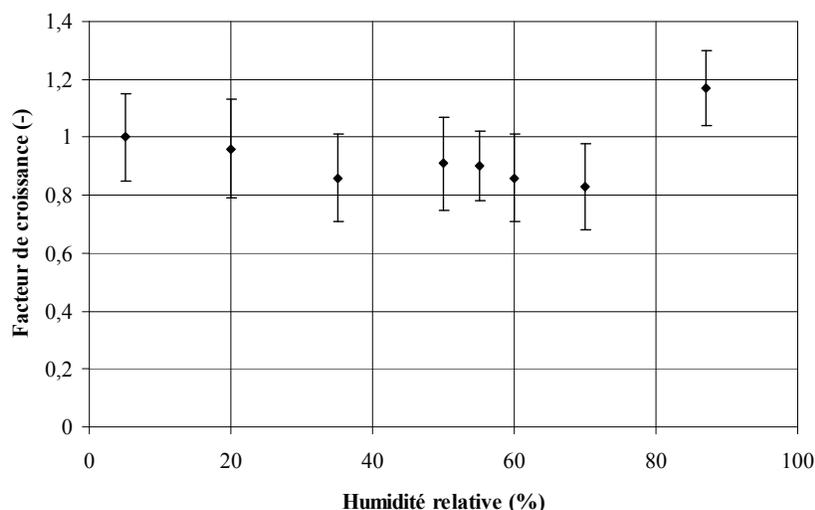


Figure 2-18 : Evolution du facteur de croissance de l'aérosol de chlorure de sodium en fonction de l'humidité relative de l'air

Les résultats indiquent que le diamètre de l'aérosol de chlorure de sodium diminue lorsque l'humidité relative de l'air augmente de 5 à 70 % : le facteur de croissance passe ainsi de 1,00 à 0,83. Un tel comportement de l'aérosol de chlorure de sodium a déjà été observé dans la littérature, notamment par Krämer *et al.* (2000) et Biskos *et al.* (2006). Selon les auteurs, les particules primaires de chlorure de sodium en sortie du générateur forment des agglomérats qui se réarrangent en présence d'humidité. Des clichés d'observation à l'aide d'un Microscope Electronique à Transmission (MET) de l'aérosol de chlorure de sodium ont été effectués par prélèvement dans le banc d'essais en air sec. Un de ces clichés, proposé sur la figure 2-19, semble confirmer l'existence possible d'agglomérats (encadrés en rouge sur la photographie). Ces observations par MET permettent également de confirmer la forme cubique des particules de chlorure de sodium isolées.

\* Lorsque les particules de chlorure de sodium sont sous forme liquide, le diamètre aérodynamique est déterminé à l'aide de la masse volumique calculée dans la suite du paragraphe

Au-delà de 75 % d'humidité relative, les résultats en nombre indiquent que le diamètre de l'aérosol, qui se trouve alors sous forme liquide, augmente conformément à la théorie (Cf. § IV.3.2 du chapitre 1) ; les résultats en masse ne permettent pas de mettre en évidence cette augmentation car il y a une diminution du nombre de particules dans les plus grandes classes granulométriques.

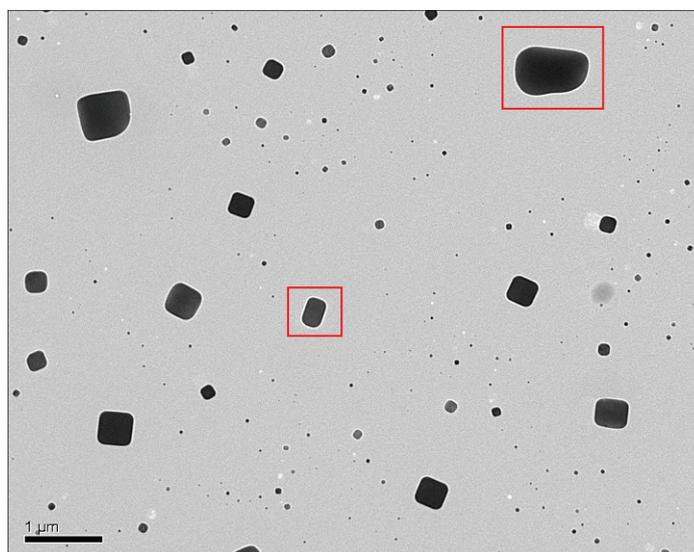


Figure 2-19 : Agrandissement au MET des particules de chlorure de sodium prélevées en air sec

#### Variation de la masse volumique des particules de NaCl en fonction de l'humidité relative de l'air

La présence d'eau adsorbée à la surface des particules peut entraîner une modification de leur masse volumique.

Pour les particules d'alumine et d'uranine, les isothermes d'adsorption ont montré une faible prise en masse d'eau ; ainsi, durant ces travaux, les masses volumiques de ces deux aérosols sont supposées constantes quelle que soit l'humidité relative de l'air. Pour les particules de chlorure de sodium, la masse volumique évolue en fonction de l'humidité relative de l'air, en particulier au-dessus du point de déliquescence.

Leinert et Wiedensohler (2007) proposent une relation pour calculer la masse volumique  $\rho_h$  de particules sphériques humides, comme par exemple des particules de chlorure de sodium après leur déliquescence :

$$\rho_h = \frac{\rho_p + \left( \frac{d_h^3}{d_p^3} - 1 \right) \cdot \rho_0}{\frac{d_h^3}{d_p^3}} \quad (2-6)$$

avec  $\rho_p$  et  $d_p$  la masse volumique et le diamètre de la particule sèche,  $d_h$  le diamètre de la particule à l'humidité de l'air considérée et  $\rho_0$  la masse volumique de la vapeur d'eau condensée.

Ainsi, la masse volumique des particules de chlorure de sodium, une fois le point de déliquescence dépassé, peut être calculée avec la relation (2-6). Les résultats, fournis dans le tableau 2-8, indiquent que la masse volumique des particules de chlorure de sodium diminue lorsque l'humidité relative de l'air dépasse le point de déliquescence.

Tableau 2-8 : Détermination de la masse volumique des particules de chlorure de sodium après leur déliquescence

HR (%)	$\bar{d}_{B,n}$ (nm)	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )
--------	----------------------	------------------------------

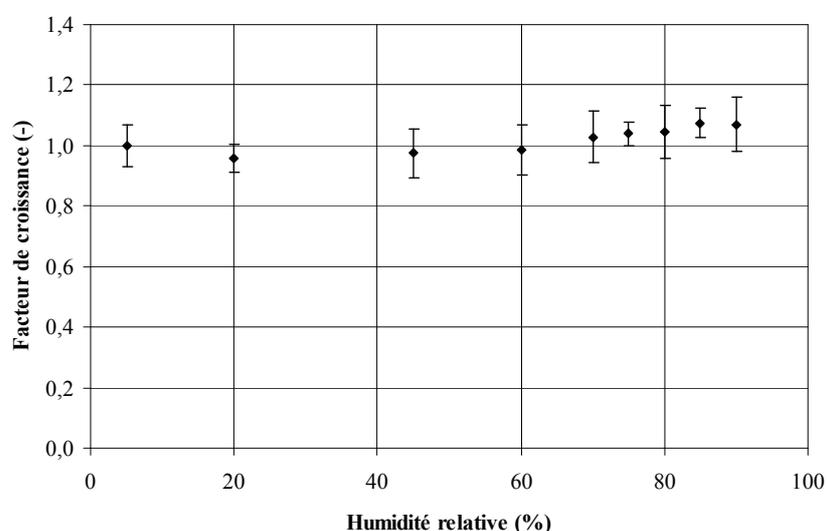
5	78	2165
87	91	1734

### c. Aérosol hygroscopique d'uranine

L'aérosol d'uranine a été caractérisé pour différents taux d'humidité relative de l'air avec le SMPS. Le tableau 2-9 regroupe les différents résultats obtenus : le diamètre de mobilité électrique moyen en nombre  $\bar{d}_{B,n}$  mesuré par le SMPS et le facteur de croissance  $g_c$  associé, le diamètre de mobilité électrique médian massique  $\tilde{d}_{B,m}$ , qui équivaut pour l'aérosol d'uranine au diamètre équivalent en volume médian massique  $\tilde{d}_{ev,m}$ , l'écart-type géométrique  $\sigma_g$  associé, le diamètre aérodynamique médian massique  $\tilde{d}_{ae,m}$  calculé avec la relation (2-2) et enfin, la concentration numérique  $C_n$  en aérosol fournie par le SMPS. L'évolution du facteur de croissance est représentée sur la figure 2-20. Pour le calcul de l'incertitude sur le facteur de croissance, l'incertitude associée aux valeurs de  $\bar{d}_{B,n}$  n'ayant pas été reproduites est prise égale à 5 %, valeur maximale des incertitudes correspondant aux valeurs reproduites.

Tableau 2-9 : Caractérisation granulométrique de l'aérosol d'uranine sous humidité

HR (%)	$\bar{d}_{B,n}$ (nm)	$g_c$ (-)	$\tilde{d}_{B,m} = \tilde{d}_{ev,m}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_g$ (-)	$\tilde{d}_{ae,m}$ ( $\mu\text{m}$ )	$C_n$ ( $\times 10^6$ part.cm $^{-3}$ )
5	64 $\pm$ 2	1,00 $\pm$ 0,07	0,14 $\pm$ 0,00	1,6	0,18 $\pm$ 0,00	1,35 $\pm$ 0,07
20	62 $\pm$ 1	0,96 $\pm$ 0,05	0,14 $\pm$ 0,00	1,6	0,18 $\pm$ 0,00	1,38 $\pm$ 0,08
45	63	0,98 $\pm$ 0,08	0,14	1,6	0,18	1,50
60	64	0,99 $\pm$ 0,08	0,15	1,6	0,19	1,55
70	66	1,03 $\pm$ 0,09	0,15	1,6	0,19	1,34
75	67 $\pm$ 0	1,04 $\pm$ 0,04	0,15 $\pm$ 0,00	1,6	0,19 $\pm$ 0,00	1,60 $\pm$ 0,02
80	68	1,05 $\pm$ 0,09	0,15	1,6	0,19	1,63
85	69 $\pm$ 1	1,08 $\pm$ 0,05	0,15 $\pm$ 0,00	1,6	0,19 $\pm$ 0,00	1,52 $\pm$ 0,36
90	69	1,07 $\pm$ 0,09	0,15	1,6	0,19	1,48



*Figure 2–20 : Evolution du facteur de croissance de l'aérosol d'uranine en fonction de l'humidité relative de l'air*

Les résultats montrent que le diamètre de l'aérosol d'uranine reste stable sur toute la gamme d'humidité relative étudiée : le facteur de croissance varie entre 0,96 et 1,08 ; le point de déliquescence de l'aérosol d'uranine se situe donc à un taux d'humidité relative supérieur à 90 %, conformément aux conclusions de Pradel et Brion (1970).

Les résultats indiquent également que la concentration en particules mesurée au cours des essais par le SMPS demeure stable sur toute la gamme d'humidité étudiée puisque l'écart entre la concentration moyenne en air sec et la concentration moyenne à 90 % d'humidité relative est de 10 %.

### Bilan

Trois aérosols sont mis en œuvre durant ces travaux : un aérosol micronique d'alumine de nature non-hygroscopique et un aérosol submicronique de chlorure de sodium de nature hygroscopique, tous les deux utilisés pour le colmatage des filtres, ainsi qu'un aérosol submicronique d'uranine de nature hygroscopique, utilisé pour la mesure du coefficient d'épuration des filtres plissés. Dans le cas de l'aérosol d'alumine, la loi de distribution des diamètres est bimodale et pour les aérosols de chlorure de sodium et d'uranine, cette dernière est log normale. L'évolution du diamètre des aérosols en présence d'humidité a été étudiée. Les résultats, qui révèlent des tendances différentes selon la nature plus ou moins hygroscopique de l'aérosol, seront utilisés pour l'interprétation des courbes d'évolution de la perte de charge des filtres durant leur colmatage.

La partie suivante présente les différents filtres mis en œuvre durant les travaux.

## III. FILTRES TESTES

Deux géométries de filtres ont été testées durant ces travaux : plane et plissée. Dans les deux cas, les filtres sont composés du même medium filtrant.

### III.1. Technologie des filtres testés

Les deux types de filtres testés sont de dimensions et de surfaces de filtration différentes ; une photographie des deux types de filtres étudiés est présentée sur la figure 2–21. A chaque dimension de filtre correspond un caisson de filtration adapté. Les filtres sont en position verticale par rapport à l'écoulement de l'air.

Le tableau 2–10 rassemble les dimensions et les surfaces de filtration des deux différents types de filtres, ainsi que le débit nominal de ces filtres. Le débit nominal est une grandeur généralement utilisée par les constructeurs de filtres plissés ; il s'agit du débit pour lequel, d'une part la perte de charge du filtre est voisine de 250 Pa, d'autre part la vitesse de filtration est comprise entre 2,5 et 3 cm.s<sup>-1</sup>. La notion de débit nominal est, dans le cadre de ces travaux, étendue aux filtres plans.



*Figure 2–21 : Photographie d'un filtre THE plan (à gauche) et d'un filtre THE plissé (à droite) étudiés durant ces travaux*

Tableau 2-10 : Grandeurs caractéristiques des filtres testés

Géométrie du filtre	Dimensions (m×m×m)	Surface de filtration (m <sup>2</sup> )	Débit nominal (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )
Plane	0,305×0,305×0,044	0,08	8
Plissée h = 27,5 mm p = 2,1 mm	0,150×0,150×0,044	0,42	43

### III.2. Propriétés physiques du medium filtrant vierge

Le medium filtrant qui constitue les filtres testés est celui utilisé, mais sans le traitement thermique, pour la fabrication des filtres ayant un certificat de conformité délivré par le Centre Technique d'Homologation des Equipements Nucléaires (CTHEN) de l'IRSN. Les propriétés physiques du medium filtrant ont été déterminées au Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (LSGC) de Nancy ; les résultats sont regroupés dans le tableau 2-11.

Le medium est constitué de fibres de verre de tailles variables qui sont enchevêtrées de façon aléatoire. La distribution granulométrique des fibres a été déterminée par observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB) et analyse d'images des diamètres des fibres ; en tout, 165 fibres ont été analysées provenant de 6 échantillons différents du medium. Les résultats ont montré que la distribution granulométrique des fibres suit une loi log normale. La figure 2-22 représente un agrandissement au MEB de la surface d'un filtre plan.

L'épaisseur Z du medium a été déterminée par observation au MEB d'une tranche du medium filtrant. En tout, 24 essais ont été réalisés afin de prendre en compte l'hétérogénéité de l'épaisseur du medium filtrant sur sa surface.

Le grammage G du medium a été estimé par pesées d'échantillons du medium de surfaces connues. La compacité moyenne  $\bar{\alpha}$  du medium filtrant a ensuite été déduite des valeurs d'épaisseur et de grammage selon la relation :

$$\bar{\alpha} = \frac{G}{\rho_f \cdot Z} \quad (2-7)$$

avec  $\rho_f$  la masse volumique de la fibre de verre (2500 kg.m<sup>-3</sup>).

Tableau 2-11 : Principales caractéristiques physiques du medium filtrant testé

Diamètre des fibres			Z (µm)	G (g.m <sup>-2</sup> )	$\bar{\alpha}$ (-)
Diamètre moyen géométrique (µm)	Ecart-type géométrique (-)	Diamètre moyen en nombre (µm)			
0,6	2,2	0,9	521 ± 31	92 ± 2	0,071 ± 0,006

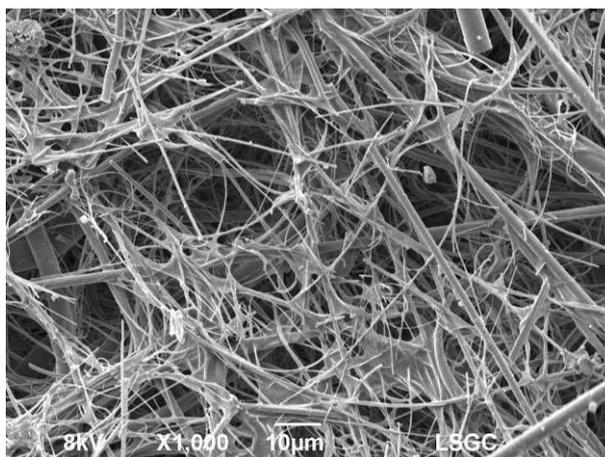


Figure 2–22 : Agrandissement au MEB de la surface d'un filtre plan

### III.3. Performances des filtres vierges

#### III.3.1. Caractérisation aéraulique des filtres

L'évolution de la perte de charge d'un filtre vierge en fonction de la vitesse de filtration a été étudiée pour les deux géométries de filtres plane et plissée.

##### a. Filtres plans

Les essais ont été réalisés en air propre et sec ( $HR = 5\%$  et  $T = 25\text{ °C}$ ) sur plusieurs filtres plans. Des essais ont montré que la perte de charge du cadre est négligeable par rapport à celle du medium filtrant ; ainsi, l'évolution de la perte de charge des filtres plans vierges en fonction de la vitesse de filtration peut être assimilée à celle du medium filtrant, ce qui permet de déterminer la résistance aéraulique du medium.

Le régime d'écoulement à travers le medium filtrant est calculé à l'aide de  $Re_{po}$  défini par la relation (1–2) sur toute la gamme de vitesses étudiée (entre  $0,025$  et  $0,35\text{ m.s}^{-1}$ ). Dans le calcul, la surface volumique des fibres  $A_f$  est déterminée à partir de leur diamètre moyen en nombre  $\bar{d}_{fn}$  selon la relation :

$$A_f = \frac{4}{\bar{d}_{fn}} \quad (2-8)$$

Les résultats, regroupés dans le tableau 2–12, indiquent que le régime d'écoulement est laminaire sur toute la gamme de vitesses étudiée puisqu'il faudrait une vitesse de plus de  $4,7\text{ m.s}^{-1}$  pour que l'écoulement ne soit plus laminaire ; ainsi, la loi de Darcy peut être utilisée pour exprimer la perte de charge du medium filtrant.

Tableau 2–12 : Détermination du régime d'écoulement à travers le filtre plan en fonction de la vitesse de filtration

$U_f\text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	$Re_{po}\text{ (-)}$
0,025	$\cong 5.10^{-3}$
0,35	$\cong 7.10^{-2}$
4,7	1

Les résultats de l'évolution de la perte de charge des filtres plans vierges en fonction de la vitesse de filtration, représentés sur la figure 2–23, permettent de déterminer les grandeurs caractéristiques suivantes :

- la perméabilité du milieu fibreux B par la formule (1-3),
- la résistance du medium filtrant  $K_1$  par la formule (1-6),
- le diamètre aéraulique des fibres  $d_a$  par la formule (1-10), appelé également diamètre de Davies.

Le tableau 2-13 regroupe les valeurs obtenues.

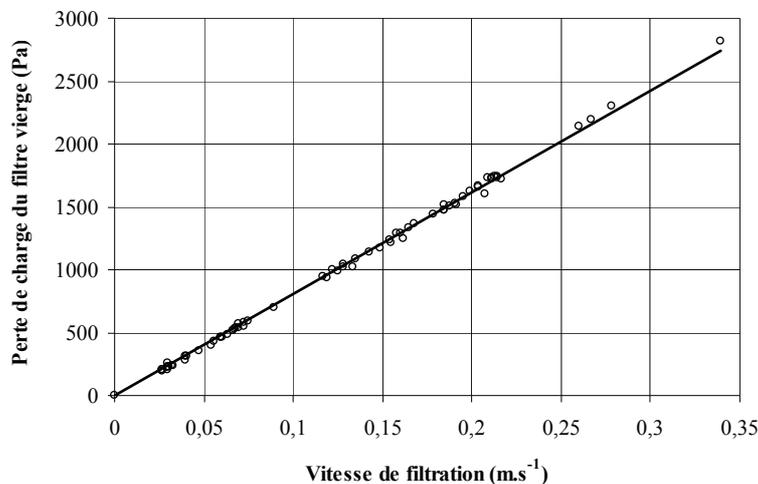


Figure 2-23 : Evolution de la perte de charge à travers les filtres plans vierges en fonction de la vitesse de filtration

Tableau 2-13 : Caractérisation aéraulique du medium filtrant vierge

Perméabilité B (m <sup>2</sup> )	Résistance $K_1$ (m <sup>-1</sup> )	Diamètre aéraulique des fibres $d_a$ (μm)
$1,18.10^{-12}$	$4,42.10^8$	1,2

#### b. Filtres plissés

Comme pour les filtres plans, l'évolution de la perte de charge de filtres plissés vierges en fonction de la vitesse de filtration a été étudiée avec un air propre et sec (HR = 5 % et T = 25 °C) ; des valeurs théoriques ont ensuite été calculées à partir des deux modèles recensés dans le premier chapitre de cette étude, à savoir le modèle adimensionnel de Del Fabbro (2001) et le modèle semi-théorique de Thomas (Callé-Chazelet *et al.*, 2008 a).

La figure 2-24 regroupe les valeurs expérimentales d'évolution de la perte de charge des filtres plissés vierges en fonction de la vitesse de filtration, ainsi que les valeurs théoriques issues des deux modèles. Il apparaît que, jusqu'à une vitesse de filtration de 6 cm.s<sup>-1</sup>, les deux modèles permettent une très bonne estimation de la perte de charge des filtres ; pour des vitesses de filtration plus importantes, le modèle de Del Fabbro (2001) sous-estime les valeurs expérimentales de la perte de charge du filtre, alors que celui de Thomas (Callé-Chazelet *et al.*, 2008 a) présente une bonne corrélation sur toute la gamme de vitesses étudiée.

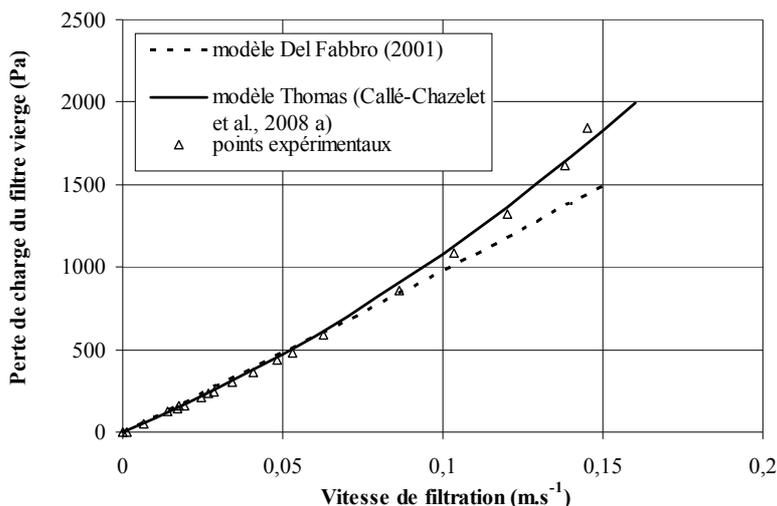


Figure 2–24 : Comparaison des modèles de prédiction de la perte de charge d'un filtre à petits plis vierge avec des valeurs expérimentales, en fonction de la vitesse de filtration

La figure 2–25 regroupe les résultats obtenus pour les deux types de filtres plans et plissés. Jusqu'à une vitesse de filtration de  $5 \text{ cm.s}^{-1}$  les deux courbes sont confondues ; au-delà de  $5 \text{ cm.s}^{-1}$ , la perte de charge du filtre plissé ne peut plus être exprimée par la loi de Darcy, en raison des pertes de charge additionnelles liées au plissage.

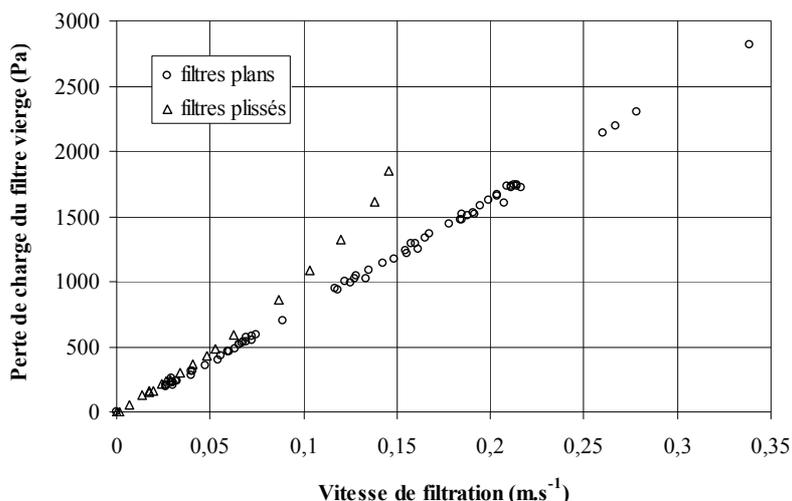


Figure 2–25 : Influence de la géométrie plane ou plissée du filtre THE vierge sur l'évolution de sa perte de charge en fonction de la vitesse de filtration

### III.3.2. Efficacité de filtration

#### a. Principe de la mesure

La méthode retenue pour caractériser l'efficacité d'un filtre durant ces travaux est la méthode normalisée NF X 44-011 utilisée sur site en France dans l'industrie nucléaire.

Le principe de la mesure de l'efficacité d'un filtre selon la norme française NF X 44-011, consiste à injecter un aérosol solide d'uranine (fluorescéine sodée), de diamètre aérodynamique médian massique de  $0,18 \mu\text{m}$  correspondant au minimum d'efficacité des filtres, en amont du filtre à contrôler. Cet aérosol est prélevé en amont et en aval du filtre à tester au moyen de filtres de prélèvement. L'aérosol d'uranine est ensuite extrait de ces filtres par lavage et les solutions obtenues sont titrées par mesure de leur fluorescence. L'efficacité est ensuite exprimée à l'aide du coefficient d'épuration selon la relation (1–21).

## b. Résultats

L'influence de la vitesse de filtration sur le coefficient d'épuration de plusieurs filtres vierges à petits plis a été étudiée en conditions d'air ambiant (humidité relative proche de 50 % et température de l'air d'environ 20 °C). La figure 2–26 regroupe les résultats obtenus.

La granulométrie de l'aérosol d'uranine filtré correspond au minimum d'efficacité des filtres ; dans cette gamme de diamètres, les différents mécanismes de collecte (diffusion, interception et inertie) interviennent ; néanmoins, pour la gamme de vitesses de filtration étudiée (entre 1 et 6 cm.s<sup>-1</sup>), ce sont les mécanismes de collecte par diffusion et interception qui sont prépondérants. Ainsi, conformément à la théorie, l'efficacité de collecte diminue lorsque la vitesse de filtration augmente, dans la gamme de vitesses testée. Les résultats expérimentaux indiquent que pour une vitesse de filtration de 3 cm.s<sup>-1</sup>, le coefficient d'épuration du filtre plissé vierge mis en œuvre se situe autour de 2.10<sup>4</sup>.

L'efficacité théorique du medium est calculée avec le modèle d'efficacité de Gougeon (1994) et comparée avec les résultats expérimentaux sur la figure 2–26. Compte tenu de la forte polydispersion du diamètre des fibres, le modèle d'efficacité a été testé pour trois diamètres de fibres : 0,75 µm, 0,9 µm (le diamètre moyen en nombre) et 1,05 µm. Les résultats obtenus mettent en évidence la forte sensibilité du modèle au diamètre des fibres, l'un des paramètres les plus difficiles à caractériser en filtration industrielle et cela d'autant plus que la taille des fibres est polydispersée. Il convient de préciser que les modèles actuels, en particulier celui de Gougeon (1994), ont été élaborés en utilisant des media plans composés de fibres de diamètre monodispersé. Même si les résultats théoriques obtenus avec le diamètre moyen des fibres sont les plus proches des valeurs expérimentales, il faut néanmoins être très prudent sur l'aptitude des modèles actuels théoriques d'efficacité à retranscrire la réalité expérimentale dans le cas de filtres industriels.

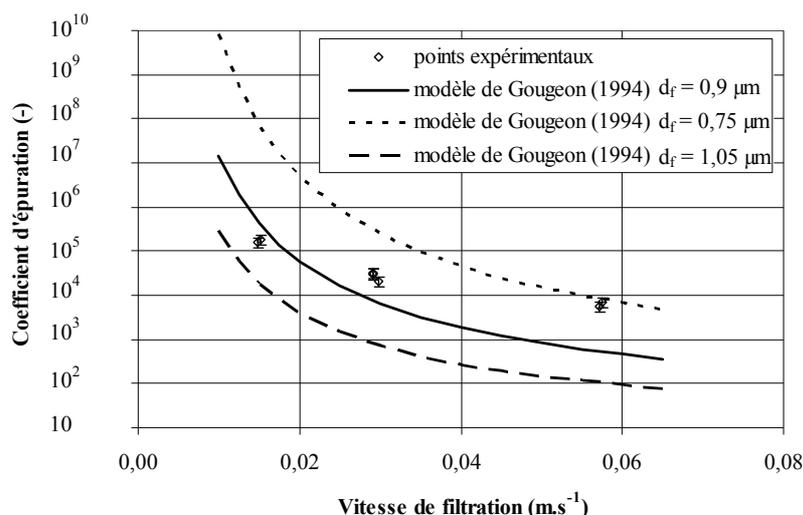


Figure 2–26 : Influence de la vitesse de filtration sur le coefficient d'épuration de filtres THE vierges à petits plis (comparaison modèle – expérience)

### III.3.3. Dispersion des performances nominales d'un filtre

La figure 2–27 représente le rapport  $\frac{\Delta P_0}{U_f}$  de l'ensemble des filtres plissés étudiés durant ces travaux pour des vitesses de filtration inférieures à 5 cm.s<sup>-1</sup>, i. e. lorsque la loi de Darcy reste applicable.

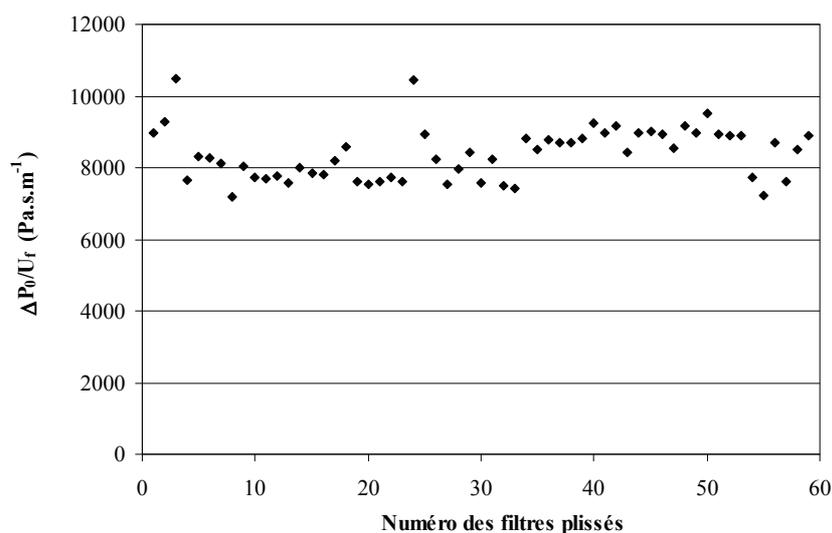


Figure 2–27 : Synthèse des rapports entre la perte de charge des filtres plissés vierges étudiés et la vitesse de filtration, en régime d'écoulement laminaire

Les résultats révèlent que le rapport  $\frac{\Delta P_0}{U_f}$  est variable d'un filtre à l'autre. Une analyse statistique des résultats permet de proposer une valeur moyenne du rapport  $\frac{\Delta P_0}{U_f}$ , lorsque le régime d'écoulement à travers le filtre est laminaire, et d'évaluer la dispersion des résultats à l'aide d'un intervalle de confiance fixé à 95 % :

$$\frac{\Delta P_0}{U_f} = 8380 \pm 186 \text{ Pa.s.m}^{-1} \quad (2-9)$$

Pour une vitesse de filtration de  $2,8 \text{ cm.s}^{-1}$ , la valeur moyenne de la perte de charge d'un filtre plissé vierge étudié durant ces travaux est donc de :

$$\Delta P_0 = 235 \pm 6 \text{ Pa} \quad (2-10)$$

Les raisons pouvant expliquer la dispersion des résultats sont :

- l'incertitude liée à la surface de filtration. En effet, chaque filtre est en grande partie fabriqué manuellement et la quantité de lut peut varier de manière sensible d'un filtre à l'autre ; ainsi, un filtre contenant plus de lut a davantage de plis collés au niveau du cadre et ainsi sa surface de filtration est diminuée ;
- les paramètres physiques du medium, tels que la compacité ou le diamètre des fibres, peuvent évoluer au sein même de la nappe de medium utilisée pour la confection des filtres et modifier les performances des filtres.

### Bilan

*L'étude des filtres plans et plissés a permis de mettre en évidence tout d'abord, que le diamètre des fibres qui constituent le medium filtrant est très polydispersé ; cela rend plus difficile l'utilisation des modèles théoriques pour le calcul du coefficient d'épuration par exemple. De plus, concernant les filtres plissés, une importante dispersion des valeurs de leur perte de charge initiale a également été soulignée.*

*La partie suivante expose la méthodologie adoptée durant ces travaux.*

## IV. METHODOLOGIE

### IV.1. Protocole expérimental

Le protocole expérimental suivi durant les travaux est décrit dans le logigramme de la figure 2–28.

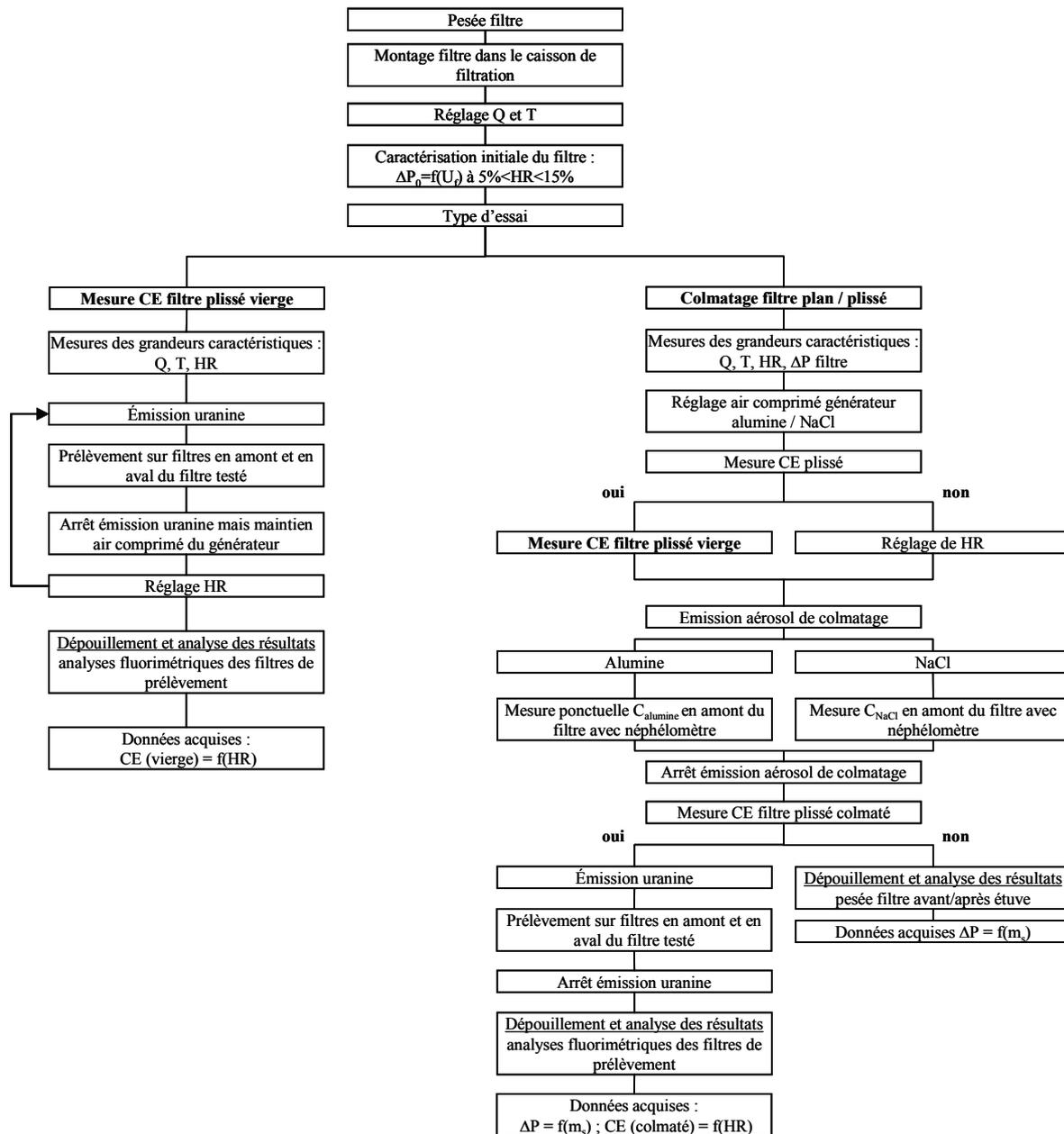


Figure 2–28 : Protocole expérimental

Les filtres sont pesés avant chaque colmatage puis installés dans le caisson de filtration. Les paramètres vitesse de filtration, température et humidité relative sont ensuite fixés. Une fois l'équilibre de ces paramètres atteint, l'aérosol est injecté. Les paramètres régulés durant les essais sont le débit de filtration et la température de l'air ; la régulation de ces deux paramètres permet, pour la durée de l'essai, de maintenir constante l'humidité relative de l'air.

Durant le colmatage, la perte de charge  $\Delta P$  du filtre est enregistrée en continu, ainsi que le débit d'air à travers le filtre, la température et l'humidité relative en particulier en amont et en aval du filtre.

Une fois l'essai terminé, le filtre colmaté est retiré du caisson et pesé une deuxième fois ; puis, après un passage de 48 h dans une étuve, le filtre est pesé une troisième et dernière fois. Les filtres ont une température de fonctionnement maximale de 70 °C ; ainsi, la température d'étuvage est fixée à 60 °C afin de ne pas détériorer les composants du filtre (lut polymère en particulier).

Des mesures du coefficient d'épuration CE sont également effectuées sur certains filtres plissés selon le protocole opératoire de la norme NF X 44-011. Lors de la mesure du CE d'un filtre colmaté, une première mesure est faite avant l'injection de l'aérosol de colmatage afin d'obtenir une valeur de l'efficacité du filtre vierge ; cela permet de s'assurer de l'intégrité du filtre et également de vérifier la présence de fuites au niveau du caisson de filtration. La mesure du CE du filtre colmaté est faite à l'humidité relative du colmatage et une fois l'arrêt de la génération de l'aérosol de colmatage, mais sans stopper le débit d'air à travers le filtre afin de ne pas perturber le dépôt des particules à sa surface.

## IV.2. Gamme d'étude

Durant chaque essai de colmatage, les paramètres vitesse de filtration, température et humidité relative de l'air sont maintenus constants. Le tableau 2-14 regroupe la gamme d'étude testée pour ces trois paramètres pour les campagnes d'essais menées sur filtres plans et sur filtres plissés.

Les durées caractéristiques des colmatages, différentes selon la géométrie du filtre et l'aérosol utilisés, sont rassemblées dans le tableau 2-15.

Tableau 2-14 : Gamme d'étude pour la vitesse de filtration, la température et l'humidité relative de l'air, lors des essais de colmatage

Filtre	T (°C)	HR (%)	$U_f$ (cm.s <sup>-1</sup> )
Plan	25 ± 2	10 à ≈ 100	3,9 à 15,6
Plissé	25 ± 2	5 à ≈ 100	1,2 à 6,9

Tableau 2-15 : Durées caractéristiques des colmatages

Filtre	$U_f$ (cm.s <sup>-1</sup> )	Durée du colmatage
<b>Aérosol d'alumine</b>		
Plan	4,0	20 min
Plissé	2,6	1 h
<b>Aérosol de chlorure de sodium</b>		
Plan	7,0	2 h
Plissé	2,7	20 h

## IV.3. Détermination des grandeurs caractéristiques durant le colmatage

Lors de l'exploitation des résultats, l'évolution de la perte de charge du filtre, ou une grandeur caractéristique de cette évolution, est exprimée en fonction de la masse surfacique d'aérosol déposé sur le filtre ; pour certains filtres plissés, le coefficient d'épuration est également déterminé à différents niveaux de colmatage.

### IV.3.1. Perte de charge

#### a. Grandeurs caractéristiques

Pour ces travaux, l'évolution de la perte de charge des filtres plans durant leur colmatage est représentée à l'aide du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  ; cela permet de s'affranchir d'une éventuelle fluctuation du débit durant le colmatage et de pouvoir également comparer entre eux des colmatages faits à des vitesses de filtration différentes.

Dans le cas des filtres plissés, l'évolution de la résistance à l'écoulement est exprimée avec le rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$ . Lors de comparaisons de courbes d'évolution de la perte de charge de filtres plans et plissés, c'est le premier rapport qui est utilisé.

La masse surfacique de particules déposées sur le filtre, i. e. le rapport entre l'évolution de la masse de particules  $m_s(t)$  et la surface de filtration initiale du filtre  $S_{f_0}$ , est déterminée différemment selon l'aérosol. Pour l'aérosol d'alumine, il a été démontré que le débit massique d'aérosol généré est constant dans le temps ; ainsi, l'évolution de la masse de particules déposées, en supposant que le débit de filtration et l'efficacité sont constants durant tout le colmatage, est calculée à l'aide des pesées du filtre avant et après le colmatage et de la durée de l'essai selon la relation :

$$m_s(t) = m_s(t_f) \cdot \frac{t}{t_f} \quad (2-11)$$

avec  $m_s(t_f)$  la masse totale déposée sur le filtre (déterminée par pesées),  $t_f$  correspondant à la durée totale de génération.

Pour l'aérosol de chlorure de sodium, l'évolution de la masse de particules déposées sur le filtre  $m_s(t)$  est déterminée à partir de l'évolution des concentrations massiques enregistrées par le néphélomètre, puis pondérée, à partir de la masse réelle déposée sur le filtre. Ainsi,  $m_s(t)$  s'écrit :

$$m_s(t) = \int_0^t q_{\text{NaCl}}(t) \cdot dt \quad (2-12)$$

avec  $q_{\text{NaCl}}$  le débit massique d'aérosol présent en amont du filtre, déduit de la concentration massique d'aérosol fournie par le néphélomètre  $C_m$  selon la relation :

$$\int_0^t q_{\text{NaCl}}(t) \cdot dt = k \cdot \int_0^t C_m(t) \cdot Q_v \cdot dt \quad (2-13)$$

avec  $Q_v$  le débit volumique d'air à travers le filtre testé et  $k$ , un facteur de correction de la valeur absolue de la concentration en aérosol mesurée par le néphélomètre avec la concentration réelle en amont du filtre. Dans le cas où le néphélomètre est étalonné, le facteur  $k$  est égal à 1 ; sinon,  $k$  est déterminé à l'aide de la relation :

$$m_s(t_f) = k \cdot \int_0^{t_f} C_m(t) \cdot Q_v \cdot dt \quad (2-14)$$

Ainsi, l'évolution de la masse d'aérosol de NaCl déposée sur le filtre au cours du colmatage est calculée à partir de la relation :

$$m_s(t) = \frac{m_s(t_f)}{\int_0^{t_f} C_m(t) \cdot Q_v \cdot dt} \cdot \int_0^t C_m(t) \cdot Q_v \cdot dt \quad (2-15)$$

#### b. Incertitudes associées

L'incertitude sur l'évolution de la perte de charge des filtres, ou de tout rapport permettant de l'exprimer, en fonction de la masse surfacique de particules déposées est évaluée en termes de reproductibilité des résultats ; les résultats sont donc représentés en fonction de leur dispersion et non pas de l'incertitude sur la mesure. Ainsi, les courbes d'évolution de la perte de charge des filtres sont déterminées à l'aide d'une courbe moyenne obtenue pour une vitesse de filtration et une humidité relative données ; l'incertitude associée représente l'intervalle de confiance à 80 % (voir l'ANNEXE IX).

Lors de la représentation des évolutions de la masse d'eau adsorbée durant les colmatages en fonction de l'humidité relative du colmatage, une incertitude sur la masse est utilisée ; son calcul est présenté dans l'ANNEXE IX.

#### IV.3.2. Coefficient d'épuration

##### a. Grandeurs caractéristiques

L'efficacité des filtres plissés vierges a été étudiée en fonction du taux d'humidité relative de l'air. La norme NF X 44-011 impose une humidité relative de l'air, pour la mesure du coefficient d'épuration des filtres, inférieure à 80 % ; néanmoins, les filtres ont été testés à des taux d'humidité relative supérieurs à cette valeur. Les évolutions des coefficients d'épuration sont exprimées en fonction de l'humidité relative de l'air ou du rapport de mélange.

L'efficacité de filtres plissés colmatés avec l'aérosol d'alumine ou l'aérosol de chlorure de sodium a également été évaluée. Les évolutions des coefficients d'épuration sont exprimées en fonction de la perte de charge des filtres ou de la masse surfacique de particules déposées.

##### b. Incertitudes associées

La mesure expérimentale du coefficient d'épuration d'un filtre conduit à des incertitudes dont l'estimation est issue d'un mode opératoire utilisé à l'IRSN (Mocho, 2006) ; le calcul des incertitudes utilisé durant ces travaux est présenté dans l'ANNEXE IX.

#### Bilan

*Cette partie a permis de décrire le protocole expérimental mis en œuvre dans le cas des colmatages et des mesures du coefficient d'épuration des filtres, ainsi que les gammes d'étude employées pour la température, l'humidité relative et la vitesse de filtration. Enfin, les grandeurs caractéristiques adoptées pour l'exploitation des résultats expérimentaux de colmatage, ainsi que leur incertitude associée, ont été précisées.*

## V. CONCLUSION

Ce chapitre a permis de décrire tout d'abord, l'ensemble du banc d'essais utilisé durant ces travaux, ainsi que la métrologie associée. Les deux types de filtres testés, plans et plissés, ont également été décrits. L'étude des propriétés physiques du médium filtrant, constituant les deux types de filtres, a notamment mis en évidence une importante polydispersion du diamètre des fibres ; cette polydispersion rend plus que délicate l'utilisation des différents modèles de perte de charge ou d'efficacité issus de la littérature. Les performances initiales en air sec ( $T = 25\text{ °C}$  et  $5 < HR < 15\%$ ) des filtres plans et plissés ont également été étudiées. Une importante dispersion des valeurs de la perte de charge initiale des filtres plissés a été soulignée.

Les trois différents aérosols utilisés durant les travaux, ainsi que leur système de génération associé, ont été présentés. Une caractérisation des aérosols en air sec a montré que la distribution granulométrique de l'aérosol d'alumine est micronique et bimodale ; celles des aérosols de chlorure de sodium et d'uranine sont submicroniques et suivent une loi log normale. Une caractérisation granulométrique des aérosols en fonction de l'humidité relative de l'air a également été effectuée. Les résultats, qui révèlent des tendances différentes selon la nature plus ou moins hygroscopique de l'aérosol, pourront être utilisés pour l'interprétation des courbes d'évolution de la perte de charge des filtres durant leur colmatage.

Enfin, la méthodologie employée durant les essais de colmatages et les mesures de coefficients d'épuration a été décrite, ainsi que les gammes d'étude pour la température, l'humidité relative et la vitesse de filtration. Les grandeurs caractéristiques utilisées pour l'exploitation des résultats, ainsi que leur incertitude associée, ont également été exposées.

Le chapitre suivant présente l'ensemble des résultats expérimentaux acquis durant les essais de colmatage, en présence d'humidité.

## CHAPITRE 3 : RESULTATS EXPERIMENTAUX PROPRES A L'INFLUENCE DE L'HUMIDITE DANS LE DOMAINE DE LA FILTRATION THE

Ce troisième chapitre expose les résultats expérimentaux propres à l'influence de l'humidité dans le domaine de la filtration THE obtenus durant ces travaux. Une caractérisation des performances initiales des filtres, en fonction de l'humidité relative de l'air, est tout d'abord proposée. Les résultats des colmatages sous humidité des filtres plans et plissés avec l'aérosol non-hygroscopique d'alumine et l'aérosol hygroscopique de chlorure de sodium sont ensuite exprimés en termes d'évolution de leur perte de charge. Afin d'expliquer les résultats, une caractérisation du dépôt des particules est présentée ainsi que l'évolution des coefficients d'épuration des filtres plissés durant leur colmatage. Enfin, ce chapitre se conclut par la présentation de résultats relatifs à l'influence de la présence d'humidité sur la perte de charge d'un filtre après son colmatage.

### I. PERFORMANCES INITIALES DES FILTRES PLISSES SOUS HUMIDITE

Cette partie présente les résultats obtenus concernant l'influence de l'humidité de l'air sur les performances initiales des filtres plissés en termes de perte de charge et d'efficacité.

#### I.1. Perte de charge initiale des filtres et masse d'eau adsorbée

L'influence de l'humidité relative de l'air sur la perte de charge d'un filtre plissé vierge a été étudiée selon deux modes opératoires distincts. Le premier consiste à augmenter l'humidité relative de l'air dans le banc d'essais par paliers croissants et à observer une éventuelle modification de la perte de charge du filtre. Le second type d'essai effectué consiste à conditionner un filtre vierge pendant plusieurs heures à un certain taux d'humidité relative ; la perte de charge du filtre est enregistrée durant ce temps et le filtre est pesé avant et après l'exposition au débit d'air humide afin d'évaluer le transfert de matière durant l'essai.

##### I.1.1. Evolution de la perte de charge d'un filtre soumis à des contraintes d'humidité par paliers

La figure 3–1 représente l'évolution du rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  d'un filtre plissé soumis, à son débit nominal de filtration, à des contraintes d'humidité par paliers croissants d'environ 1 h d'exposition de 18 % à presque 100 % d'humidité relative ;  $\Delta P_0$  correspond à la perte de charge du filtre au début de l'essai. Les résultats révèlent que le rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  demeure stable sur toute la gamme d'humidité relative étudiée.

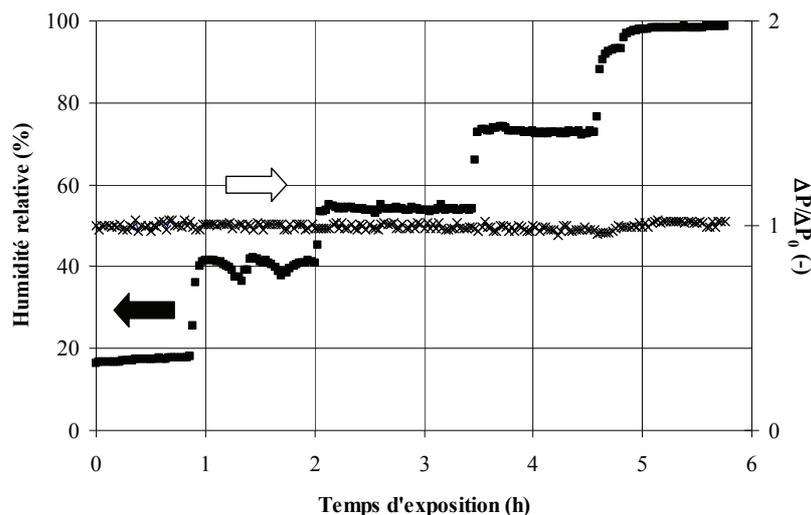


Figure 3-1 : Evolution de la perte de charge d'un filtre plissé vierge soumis à des paliers d'humidité

### I.1.2. Evolution du transfert de masse durant l'exposition d'un filtre vierge à un débit d'air humide

Plusieurs filtres ont été exposés à leur débit nominal de filtration à un flux d'air humide pendant environ 15 h, correspondant par la suite à la durée moyenne des colmatages avec l'aérosol de chlorure de sodium. Le tableau 3-1 résume pour chaque essai les conditions opératoires, ainsi que la masse des filtres avant l'exposition et celle déterminée après l'exposition et un étuvage à une température de 60 °C. Plusieurs filtres vierges n'ayant pas subi d'exposition à un débit d'air humide ont également été étuvés : une diminution de masse de ces filtres de 0,8 g est apparue ; cette variation de masse est utilisée pour corriger les quantités d'eau transférée principalement par adsorption.

Tableau 3-1 : Transfert de masse durant l'exposition d'un filtre vierge à un débit d'air humide

Conditions d'exposition HR (%)	Masse initiale du filtre (g)	Masse du filtre après exposition et étuvage (g)	Masse d'eau adsorbée (g)	Masse d'eau adsorbée corrigée (g)
60	347,2	346,4	0,8 ± 0,2	0 ± 0,2
85	348,1	347,4	0,7 ± 0,2	- 0,1 ± 0,2
95-100	346,8	346,2	0,6 ± 0,2	- 0,2 ± 0,2

La masse d'eau adsorbée corrigée est la différence entre la masse d'eau adsorbée pendant l'exposition et la valeur moyenne de 0,8 g obtenue avec des filtres vierges sans exposition à un débit d'air humide.

Les résultats indiquent que la masse d'eau adsorbée par un filtre vierge durant une exposition pendant plusieurs heures à un débit d'air humide est négligeable, même sous très forte humidité. Il convient de préciser que, comme dans le paragraphe précédent, la perte de charge des filtres durant ces essais est restée stable.

### I.2. Efficacité initiale des filtres

Des mesures du coefficient d'épuration des filtres plissés vierges ont été effectuées à la vitesse nominale de filtration (environ 2,6 cm.s<sup>-1</sup>) avec l'aérosol d'uranine. Les prescriptions de la norme NF X 44-011 ont été suivies hormis la valeur de l'humidité relative de l'air. En effet, la norme impose un taux d'humidité relative de l'air inférieur à 80 % ; or, les mesures ont été effectuées sur une gamme d'humidité relative s'étendant de 5 à 100 %.

### I.2.1. Résultats expérimentaux

La figure 3–2 regroupe l'ensemble des résultats des mesures du coefficient d'épuration de filtres THE à petits plis vierges effectuées à différents taux d'humidité relative de l'air.

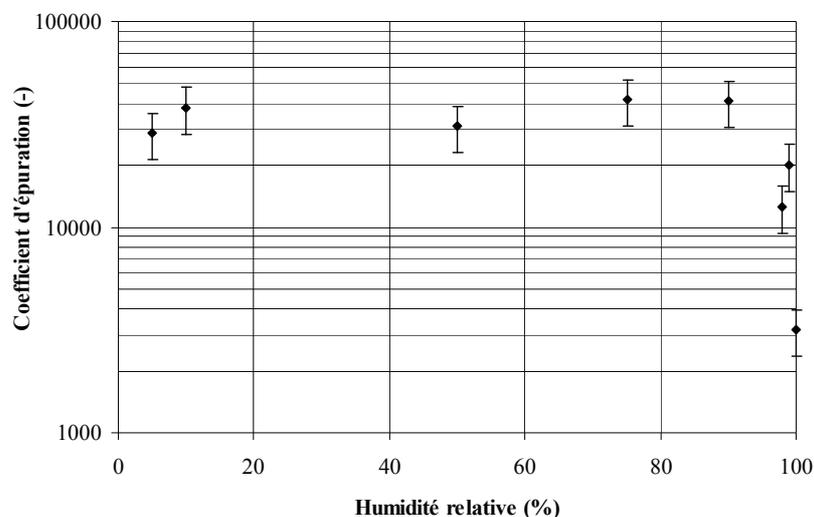


Figure 3–2 : Influence de l'humidité relative de l'air sur le coefficient d'épuration, mesuré à l'uranine et à la vitesse nominale de filtration, de filtres THE à petits plis vierges

Les résultats indiquent que le coefficient d'épuration des filtres vierges n'est pas affecté significativement par l'humidité relative de l'air entre 10 et 90 %. Au-delà de 90 % d'humidité relative, la valeur du coefficient d'épuration diminue lorsque l'humidité relative de l'air augmente. Le coefficient d'épuration des filtres THE à petits plis testés passe ainsi d'une valeur d'environ 35 000 en air humide ( $HR < 90\%$ ) à environ 3 000 pour un air proche de la saturation.

Ces résultats confirment ceux d'Adams, cité par Laborde (2000) (Cf. § V.1.2 du chapitre 1).

### I.2.2. Interprétation

Trois phénomènes peuvent expliquer cette baisse de la valeur du coefficient d'épuration.

Tout d'abord, il est possible que cette diminution du coefficient d'épuration des filtres vierges soit liée à une modification de paramètres aérauliques. Cependant, les résultats de Tsilingiris (2008) révèlent que la viscosité dynamique et la masse volumique de l'air évoluent très peu à 25 °C lorsque l'humidité relative de l'air est comprise entre 0 et 100 %.

Le deuxième phénomène pouvant expliquer cette baisse est lié à l'aérosol d'uranine, et en particulier à son hygroscopicité. En effet, au-delà d'une certaine valeur d'humidité de l'air, l'uranine se trouve sous forme liquide. Les mesures granulométriques de l'aérosol ont montré que le diamètre de l'aérosol est stable de 5 à 90 % d'humidité relative. Ainsi, si l'uranine se trouve sous forme liquide au-delà de 90 % d'humidité relative, les mécanismes de collecte demeurent les mêmes, à savoir l'impaction, la diffusion brownienne et l'inertie, mais les performances associées à l'aérosol sont modifiées. La masse volumique et le diamètre de l'aérosol sont les deux paramètres principaux pouvant évoluer en présence d'humidité. Cependant, le passage d'une particule solide à une gouttelette entraîne une augmentation du diamètre de l'aérosol ce qui devrait donc conduire à une augmentation de l'efficacité de collecte du filtre ; concernant la masse volumique de l'aérosol, elle a peu d'influence dans le calcul de l'efficacité (sauf pour l'impaction inertielle).

Ainsi, les deux premiers phénomènes proposés pour expliquer la baisse du coefficient d'épuration sont peu probants. Il est enfin possible que la présence d'humidité modifie les caractéristiques du filtre au travers du diamètre des fibres ou de la compacité du medium. En effet, une analogie peut être faite avec les modèles d'efficacité durant la filtration d'aérosols liquides qui traduisent une baisse d'efficacité du filtre dès les premiers instants du colmatage.

Le modèle de Payet (1991) par exemple considère que la formation de ponts liquides entre les fibres et aux interstices induit une diminution de la surface efficace de collecte ; ainsi, la compacité efficace du filtre est corrigée par la fraction du volume des pores occupée par le liquide. Le modèle de Gougeon (1994) explique quant à lui la baisse de l'efficacité par l'augmentation du diamètre des fibres causée par la création d'une gaine liquide autour d'elles. Néanmoins, pour que ces modèles induisent une baisse de l'efficacité du filtre aussi significative que celle obtenue expérimentalement, il faut une masse de liquide déposé sur le filtre théoriquement bien plus importante que la masse d'uranine utilisée pour la mesure du coefficient d'épuration ou que la quantité de vapeur pouvant s'adsorber pendant la mesure.

Cette baisse du coefficient d'épuration des filtres au-delà de 90 % d'humidité relative est donc difficile à interpréter quantitativement, mais elle est vraisemblablement liée à la déliquescence de l'aérosol d'uranine devenu liquide et à son interaction avec les fibres du medium filtrant.

### Bilan

*Cette première partie a permis de mettre en évidence l'influence de l'humidité sur les performances initiales d'un filtre THE.*

*Concernant le medium filtrant, les résultats ont montré que le transfert de vapeur d'eau durant l'exposition d'un filtre à un flux d'air humide est négligeable ; de même, la perte de charge d'un filtre vierge n'est pas influencée par la présence d'humidité relative dans l'air entre 5 et 100 %.*

*En termes d'efficacité, les résultats ont révélé que le coefficient d'épuration d'un filtre vierge, mesuré avec l'aérosol d'uranine, est stable jusqu'à 90 % d'humidité relative ; ainsi, en suivant les prescriptions de la norme NF X 44-011, qui imposent un taux d'humidité relative pour la mesure inférieur à 80 %, les résultats ne seront pas affectés par le taux d'humidité de l'air. Pour des mesures du coefficient d'épuration au-delà de 90 % d'humidité relative, les résultats indiquent que la valeur diminue lorsque l'humidité relative augmente.*

## **II. COLMATAGES DE FILTRES SOUS HUMIDITE**

L'objectif principal de cette partie est de caractériser les courbes d'évolution de la perte de charge des filtres plans et plissés à différents taux d'humidité relative selon la nature hygroscopique de l'aérosol déposé.

Dans le cas des filtres plissés, le colmatage sera étudié au plus jusqu'à une perte de charge maximale de 4000 Pa, afin d'éviter d'entraîner une dégradation mécanique du medium filtrant par déchirement des plis.

### **II.1. Expériences élémentaires de colmatage sur filtres plans**

Des expériences élémentaires de colmatage de filtres plans ont été effectuées avec l'aérosol d'alumine, de nature non-hygroscopique, et l'aérosol de chlorure de sodium, de nature hygroscopique. La finalité de tels essais est, d'une part de permettre une caractérisation du gâteau de particules formé à la surface du medium pour les différents taux d'humidité relative des colmatages, entreprise beaucoup trop délicate avec des filtres plissés, d'autre part de comparer les données avec celles issues de la littérature.

#### II.1.1. Courbes d'évolution de la perte de charge

##### a. Aérosol non-hygroscopique d'alumine

La figure 3-3 représente l'évolution du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  en fonction de la masse surfacique de particules d'alumine collectées pour différents taux d'humidité relative et pour une vitesse de filtration de 4,0 cm.s<sup>-1</sup>.

Les résultats indiquent que, jusqu'à une humidité relative de 94 %, toutes les courbes d'évolution de la perte de charge des filtres peuvent être considérées comme confondues. Pour un taux d'humidité relative supérieur (autour de 100 %), l'accroissement de la perte de charge est plus lent ; la résistance spécifique du gâteau pour une humidité relative proche de 100 % est donc inférieure à celle observée à des humidités plus faibles.

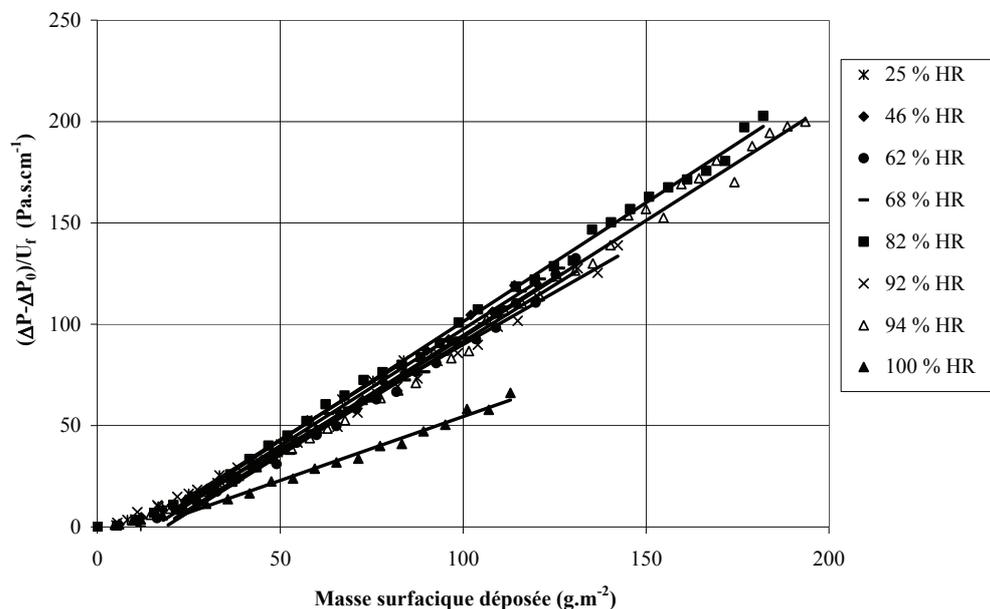


Figure 3-3 : Evolution de la perte de charge d'un filtre THE plan en fonction de la masse surfacique de particules d'alumine collectées à différents taux d'humidité relative et à une vitesse de filtration de 4,0 cm.s<sup>-1</sup>

#### b. Aérosol hygroscopique de chlorure de sodium

##### Humidité relative inférieure au point de déliquescence

La figure 3-4 représente l'évolution du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  en fonction de la masse surfacique de particules de chlorure de sodium collectées, pour différents taux d'humidité relative en dessous du point de déliquescence et pour une vitesse de filtration de 7,0 cm.s<sup>-1</sup>. La vitesse de filtration n'ayant pas d'influence sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre plan durant son colmatage selon la littérature, sa valeur a été volontairement augmentée par rapport à celle utilisée précédemment avec l'aérosol d'alumine, de façon à se dégager de la limite de fonctionnement du banc d'essais. De plus, il convient de préciser qu'il n'a pas été recherché d'atteindre systématiquement la même masse surfacique de particules collectées.

Les résultats indiquent que, pour une même masse de particules déposées, la perte de charge d'un filtre plan diminue lorsque l'humidité relative augmente ; l'effet de l'humidité est donc le même que pour les particules non-hygroscopiques mais il est plus marqué puisqu'il apparaît dès 25 % d'humidité relative et jusqu'à 70 %.

Dans les deux cas, aérosol non-hygroscopique et aérosol hygroscopique en dessous de son point de déliquescence, les courbes affichent une augmentation linéaire du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  à partir d'une certaine masse de particules collectées ; ceci atteste d'une absence de compression du gâteau au cours du colmatage.

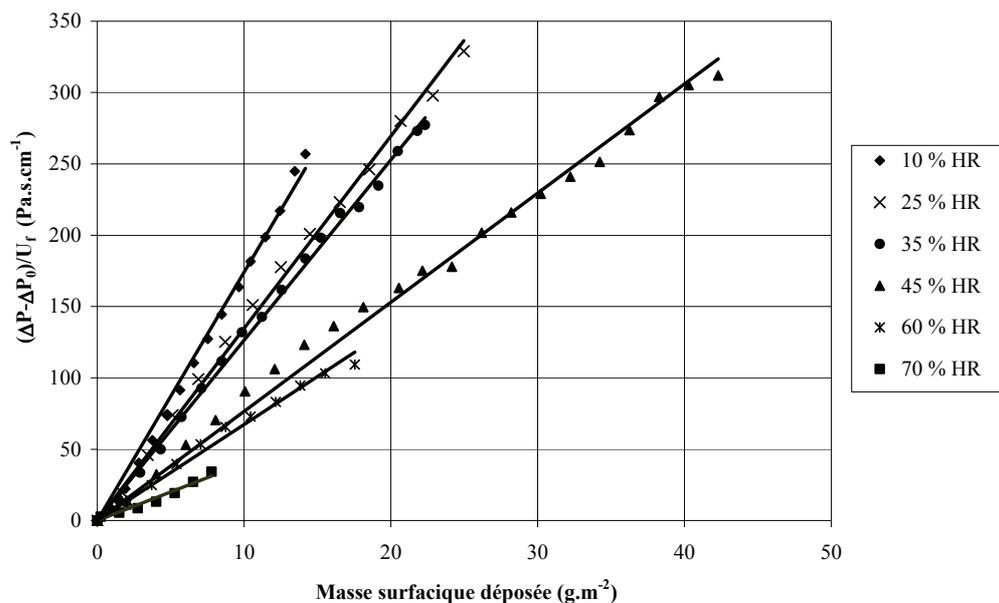


Figure 3-4 : Evolution de la perte de charge d'un filtre THE plan en fonction de la masse surfacique de particules de chlorure de sodium collectées à différents taux d'humidité relative en dessous du point de déliquescence et à une vitesse de filtration de  $7,0 \text{ cm.s}^{-1}$

#### Humidité relative supérieure au point de déliquescence

La figure 3-5 représente l'évolution de la perte de charge  $\Delta P$  du filtre en fonction de la masse surfacique de particules de chlorure de sodium collectées pour deux taux d'humidité relative supérieurs au point de déliquescence des particules (75 % d'humidité relative).

Les courbes d'évolution de la perte de charge des filtres plans sont caractéristiques d'un colmatage avec un aérosol liquide (Contal *et al.*, 2004). Conformément aux résultats de Gupta *et al.* (1993), les résultats indiquent que le film liquide apparaît à la surface du filtre pour une masse surfacique de particules liquides collectées plus importante à 88 % d'humidité relative qu'à 79 % ; en d'autres termes, le film liquide se forme pour une masse de particules liquides plus importante lorsque le diamètre de ces dernières augmente (selon la croissance d'un aérosol hygroscopique § IV.3.2 b du chapitre 1). Aucune explication n'a pu être apportée pour expliquer cette tendance.

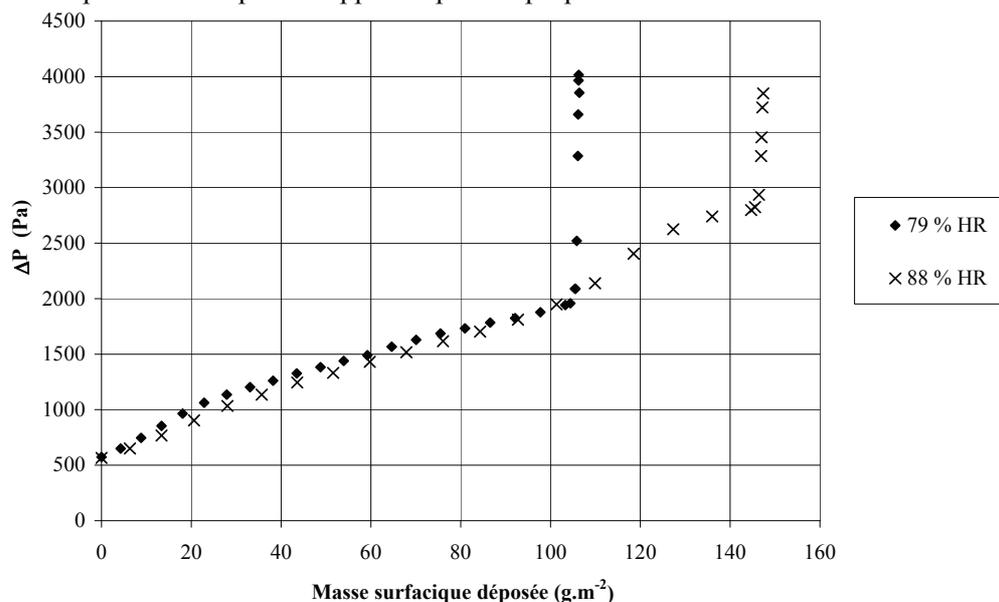


Figure 3-5 : Evolution de la perte de charge d'un filtre THE plan en fonction de la masse surfacique de particules de chlorure de sodium collectées à deux différents taux d'humidité relative au-dessus du point de déliquescence et à une vitesse de filtration de  $7,0 \text{ cm.s}^{-1}$

### II.1.2. Comparaison des résistances spécifiques des gâteaux de particules avec les données issues de la littérature

Les résultats d'évolution de la perte de charge des filtres plans obtenus durant ces travaux sont comparés à ceux issus des travaux de Gupta *et al.* (1993). Les auteurs ont travaillé avec les mêmes types de medium et d'aérosols, ainsi que dans la même gamme de vitesse de filtration ; seul le diamètre des particules diffère entre les deux études, ce qui permettra d'étudier l'influence de la taille de l'aérosol couplée à celle de l'humidité relative sur l'évolution de la perte de charge des filtres.

La figure 3-6 et la figure 3-7 rassemblent les évolutions des résistances spécifiques des gâteaux de particules en fonction de l'humidité relative du colmatage, respectivement pour un aérosol non-hygroscopique d'alumine et pour un aérosol hygroscopique de chlorure de sodium ; le diamètre aérodynamique médian massique en air sec des aérosols est précisé sur les figures.

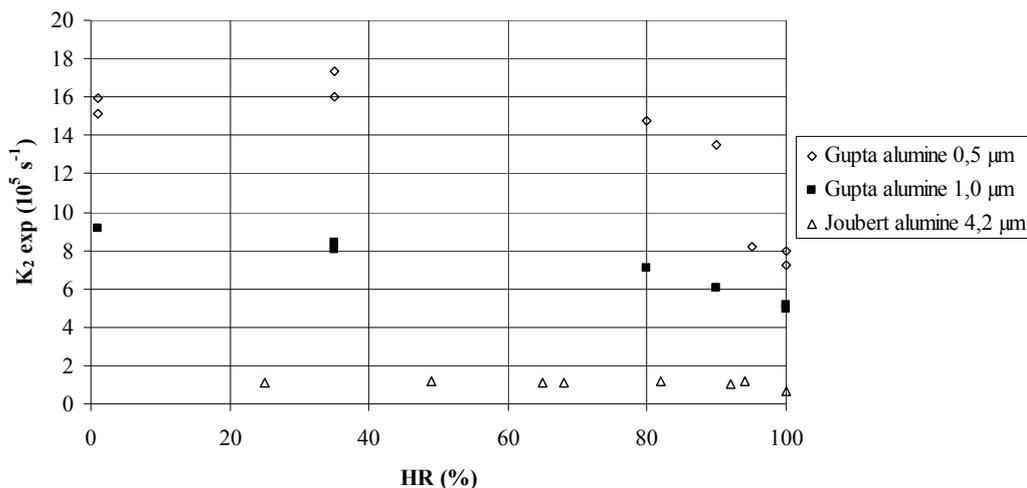


Figure 3-6 : Evolution de la résistance spécifique d'un gâteau formé de particules non-hygroscopiques d'alumine en fonction de l'humidité relative du colmatage et pour différents diamètres de particules

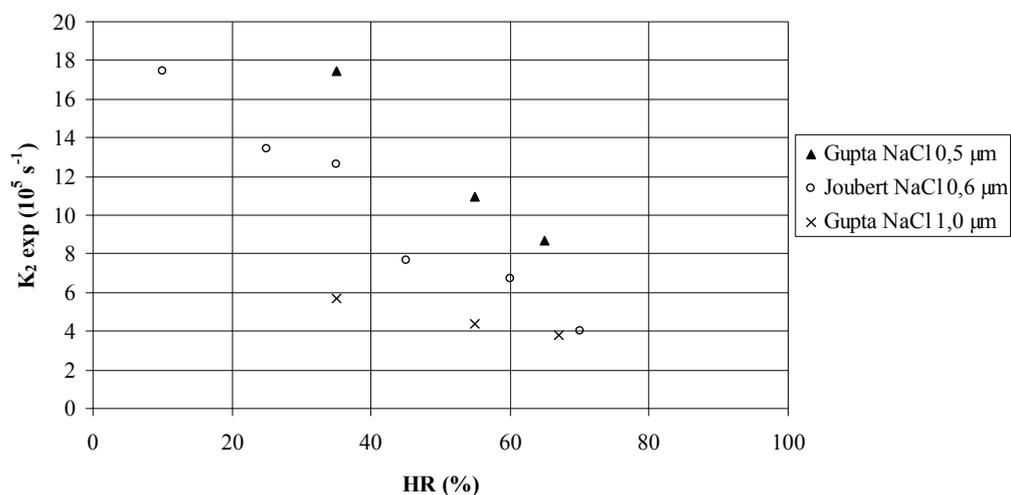


Figure 3-7 : Evolution de la résistance spécifique d'un gâteau formé de particules hygroscopiques de chlorure de sodium en fonction de l'humidité relative du colmatage et pour différents diamètres de particules

Les figures indiquent que les résultats expérimentaux pour les deux aérosols s'intègrent de façon cohérente avec ceux de Gupta *et al.* (1993). En effet, les résultats montrent que, pour un taux d'humidité relative donné, la résistance spécifique du gâteau de particules diminue en fonction de la taille de l'aérosol ; cette baisse est causée par la diminution de la surface spécifique des particules lorsque le diamètre de ces dernières augmente.

Les résultats révèlent également que l'influence de l'humidité relative de l'air sur la résistance spécifique du gâteau de particules d'alumine, est d'autant plus marquée que le diamètre de l'aérosol est faible ; en effet, pour un aérosol de 0,5  $\mu\text{m}$  de diamètre, la résistance spécifique du gâteau de particules diminue pour des taux d'humidité relative supérieurs à 80 %, alors que pour un aérosol de 4,2  $\mu\text{m}$ , la résistance spécifique du gâteau ne diminue qu'au-delà de 94 % et de façon moins importante.

Pour les particules de chlorure de sodium, même si la gamme d'étude des diamètres est plus restreinte, les résultats révèlent également que la résistance spécifique du gâteau diminue de façon plus importante lorsque le diamètre de l'aérosol passe de 1,0 à 0,5  $\mu\text{m}$ . En plus de la taille des particules, il est possible que la rugosité des particules soit un paramètre pouvant expliquer la variation des valeurs de résistances spécifiques des gâteaux en fonction de l'humidité relative (Cf. I.4.1 c du chapitre 1).

## II.2. Colmatages de filtres plissés sous humidité

Les filtres plissés ont été colmatés, d'une part avec l'aérosol d'alumine, d'autre part avec celui de chlorure de sodium à différents taux d'humidité relative. Dans les paragraphes suivants, les résultats sont présentés à l'aide du rapport entre la perte de charge du filtre durant le colmatage et sa perte de charge initiale en fonction de la masse surfacique de particules déposées. Les incertitudes associées aux résultats correspondent aux intervalles de confiance à 80 % lorsque les essais ont été reproduits ; l'intervalle de confiance a été fixé à une valeur de 80 % afin de permettre une meilleure discrimination des résultats compte tenu de la géométrie complexe des filtres plissés.

### II.2.1. Aérosol non-hygroscopique d'alumine

La figure 3–8 présente l'évolution de la perte de charge des filtres plissés colmatés avec l'aérosol non-hygroscopique d'alumine à différents taux d'humidité relative compris entre 5 et 100 % et à la vitesse nominale de filtration de 2,6  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Conformément aux résultats de Del Fabbro (2001), l'évolution de la perte de charge des filtres n'est pas linéaire en fonction de la masse surfacique de particules déposées. En effet, en air sec comme en air humide, l'évolution de la perte de charge du filtre augmente de façon exponentielle à partir d'une certaine masse de particules déposées, correspondant à une réduction importante de la surface de filtration.

Concernant l'influence de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge des filtres plissés, les résultats permettent de dégager deux zones :

- pour une humidité relative de l'air durant le colmatage comprise entre 5 et 80 %, les différentes courbes d'évolution de la perte de charge des filtres peuvent être considérées comme confondues ; ainsi, il n'y a pas d'influence significative de l'humidité dans cette zone ;
- si le taux d'humidité relative de l'air durant le colmatage est supérieur à 80 %, l'évolution de la perte de charge du filtre, pour une même masse de particules déposées, est d'autant plus importante que l'humidité de l'air est grande. De façon plus détaillée, les résultats ne montrent pas ou peu d'influence de l'humidité dans la zone de filtration en surface (jusqu'à une masse surfacique de particules déposées d'environ 50  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  pour  $\text{HR} \leq 95$  %), puis ils mettent en évidence une réduction de la surface de filtration plus rapide quand l'humidité relative augmente.

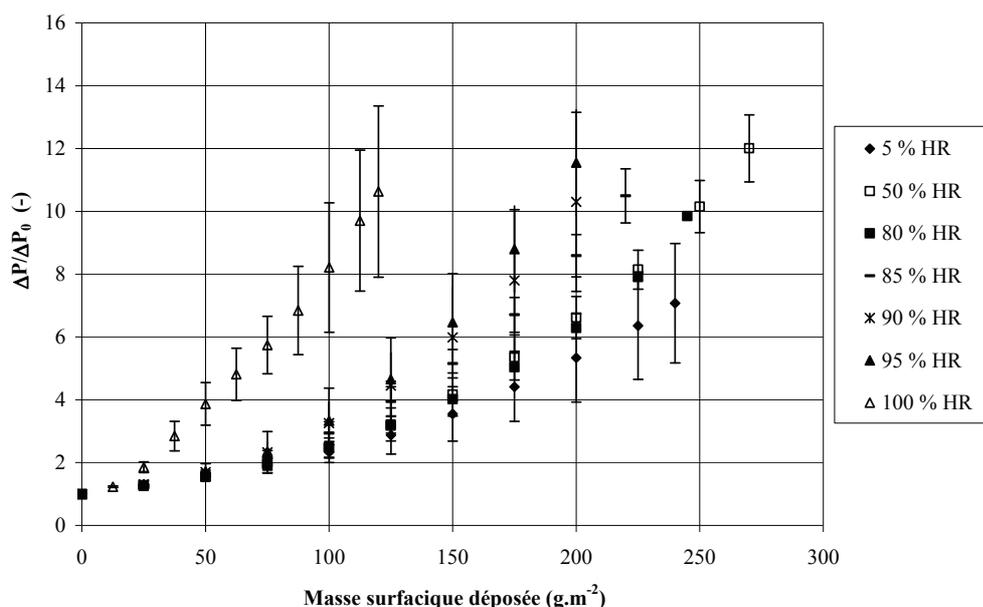


Figure 3–8 : Influence de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge de filtres à petits plis colmatés par l'aérosol non-hygroscopique d'alumine de taille micronique à une vitesse de filtration de  $2,6 \text{ cm.s}^{-1}$

La figure 3–9 présente également l'évolution de la perte de charge des filtres plissés colmatés avec l'aérosol non-hygroscopique d'alumine à différents taux d'humidité relative, mais pour deux autres vitesses de filtration :  $1,2 \text{ cm.s}^{-1}$  et  $5,0 \text{ cm.s}^{-1}$ .

Les résultats mettent en évidence la même influence de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge des filtres que celle obtenue à la vitesse nominale de filtration.

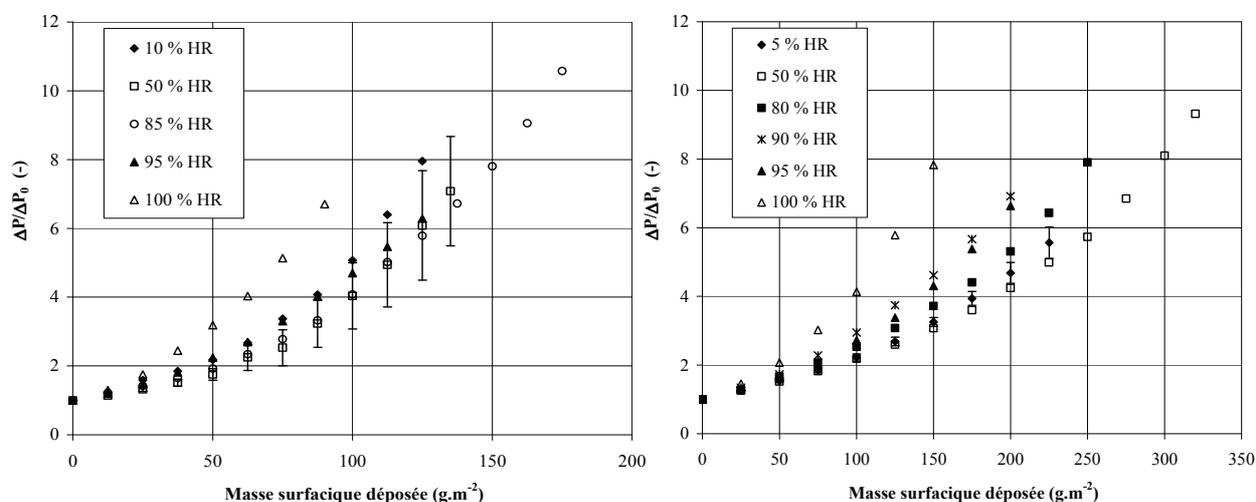


Figure 3–9 : Influence de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge de filtres à petits plis colmatés par l'aérosol non-hygroscopique d'alumine de taille micronique pour deux vitesses de filtration : à gauche  $1,2 \text{ cm.s}^{-1}$  et à droite  $5,0 \text{ cm.s}^{-1}$

## II.2.2. Aérosol hygroscopique de chlorure de sodium

La figure 3–10 présente l'évolution de la perte de charge de filtres plissés colmatés avec l'aérosol hygroscopique de chlorure de sodium à différents taux d'humidité relative compris entre 5 et 81 % et à une vitesse de filtration de  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$ .

Les résultats permettent de dégager trois zones caractéristiques suivant l'humidité relative de l'air durant le colmatage :

- pour des taux d'humidité relative inférieurs à environ 52 %, comme pour les filtres plans, l'influence de l'humidité intervient. Pendant la formation du gâteau (filtration en surface), l'augmentation de l'humidité conduit à un colmatage du filtre plus faible pour une même masse de particules déposées. Un point d'inflexion qui n'a pas pu être expliqué apparaît sur les courbes. Puis, lorsque la réduction de la surface de filtration devient importante, pour une même masse de particules déposées, commence à se dessiner une phase de colmatage d'autant plus importante que l'humidité relative de l'air est grande ; comme le colmatage n'a pas pu être étudié au-delà d'un rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  de 16 afin d'éviter la dégradation mécanique des plis du medium filtrant, cette phase n'en est qu'à son début ;
- pour un taux d'humidité relative de l'air voisin de 60 - 70 %, l'évolution de la perte de charge du filtre semble être située dans une zone de transition ; selon Foster et Ewing (1999) (Cf. § IV.3.2 c du chapitre 1), un mince film liquide est adsorbé à la surface des particules de chlorure de sodium ce qui peut expliquer l'évolution atypique du colmatage du filtre ;
- pour une humidité relative supérieure au point de déliquescence (75 %), l'aérosol est sous forme liquide et l'évolution de la perte de charge du filtre tend à devenir caractéristique de celle d'un aérosol liquide.

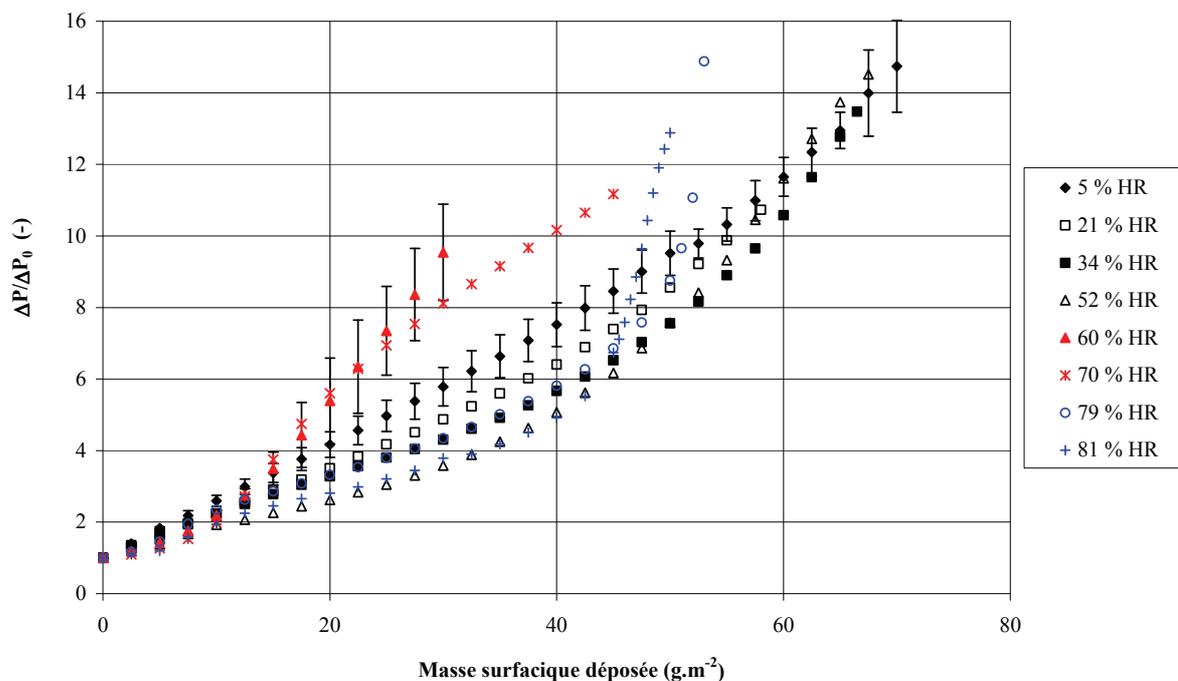


Figure 3–10 : Influence de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge de filtres à petits plis colmatés par l'aérosol hygroscopique submicronique de chlorure de sodium à une vitesse de filtration de  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$

La figure 3–11 présente également l'évolution de la perte de charge de filtres plissés colmatés avec l'aérosol hygroscopique de chlorure de sodium à différents taux d'humidité relative compris entre 5 et 45 % mais à une vitesse de filtration de  $6,9 \text{ cm.s}^{-1}$ .

Les résultats indiquent que l'influence de l'humidité relative sur l'évolution de la perte de charge du filtre est identique à celle observée à une vitesse de filtration de  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$  dans la même gamme d'humidité, pendant la phase de filtration en surface. Néanmoins, les masses de particules déposées sur les filtres ne permettent pas d'atteindre la phase de réduction de la surface de filtration.

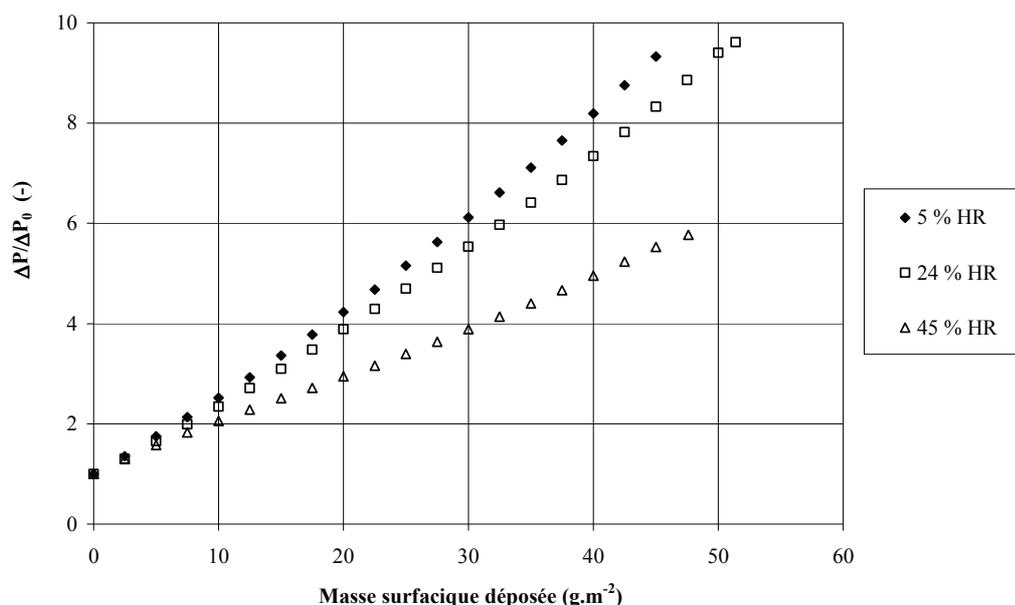


Figure 3–11 : Influence de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge de filtres à petits plis colmatés par l'aérosol hygroscopique submicronique de chlorure de sodium à une vitesse de filtration de  $6,9 \text{ cm.s}^{-1}$

### II.3. Influence de la vitesse de filtration

Le paragraphe précédent a permis de mettre en évidence l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé colmaté par un aérosol micronique d'alumine ou un aérosol submicronique de chlorure de sodium à différents taux d'humidité relative et pour différentes vitesses de filtration. L'objectif de ce paragraphe est de rassembler les résultats obtenus pour différentes vitesses de filtration et pour chaque aérosol, afin d'étudier l'influence de la vitesse de filtration, couplée à celle de l'humidité, sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre. De plus, les résultats acquis sur les filtres plissés seront comparés à ceux sur filtres plans.

Compte tenu du débit minimum de fonctionnement sur le banc d'essais ( $15 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ ), il n'a pas été possible d'étudier l'influence de la vitesse de filtration sur le même intervalle de vitesses pour les filtres plans et plissés.

#### II.3.1. Aérosol micronique d'alumine

##### a. Filtres plans

Pour des filtres THE plans en fibres de verre colmatés avec des particules microniques, il n'existe aucune donnée consolidée dans la littérature sur l'influence de la vitesse de filtration sur l'évolution de la perte de charge en air sec (Cf. § II.2.2 du chapitre 1).

Ainsi, des colmatages de filtres plans à différentes vitesses de filtration et différents taux d'humidité relative ont été effectués avec l'aérosol micronique d'alumine étudié. L'évolution du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  durant les différents colmatages est représentée sur la figure 3–12 en air sec ( $\text{HR} \leq 10 \%$ ) et

pour un taux d'humidité relative de 92 %.

Les résultats obtenus en air sec ( $\text{HR} \leq 10 \%$ ) semblent indiquer que l'augmentation de la vitesse de filtration conduit à une légère augmentation de la résistance spécifique du gâteau de particules ; la même observation peut être faite à 92 % d'humidité relative.

Ces conclusions sont à attacher au contexte de ces travaux, à savoir pour un aérosol polydispersé d'alumine de  $4,2 \mu\text{m}$  de diamètre aérodynamique médian massique ; des essais complémentaires devront être réalisés avant de généraliser ce résultat aux aérosols microniques.

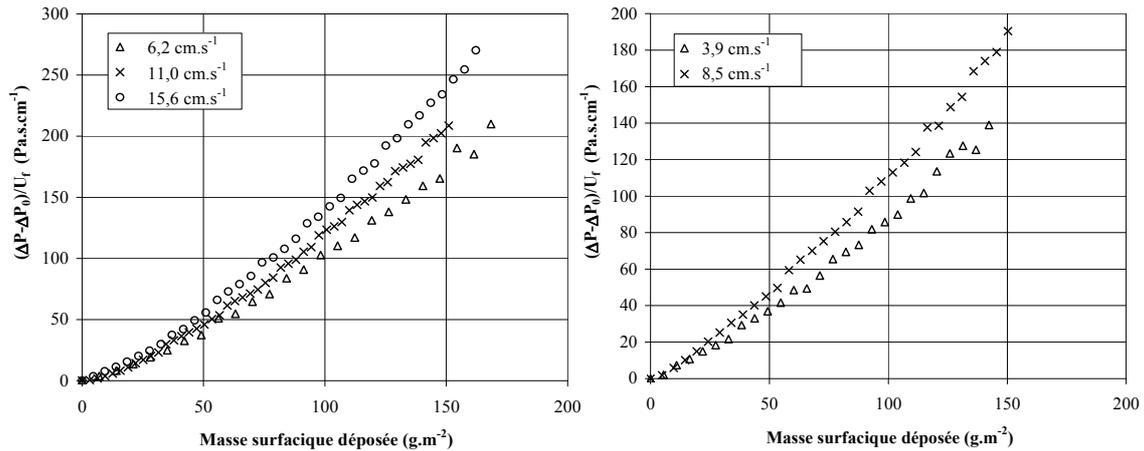


Figure 3–12 : Influence de la vitesse de filtration sur l'évolution de la perte de charge de filtres plans colmatés par l'aérosol micronique d'alumine pour deux différents taux d'humidité relative : à gauche HR<10 % et à droite HR=92 %

### b. Filtres plissés

Afin d'illustrer l'influence de la vitesse de filtration sur les filtres plissés, la figure 3–13 présente les courbes d'évolution de la perte de charge des filtres pour les trois vitesses de filtration étudiées en conditions d'air sec (HR ≤ 10 %) et en conditions d'air très humide (HR = 95 %).

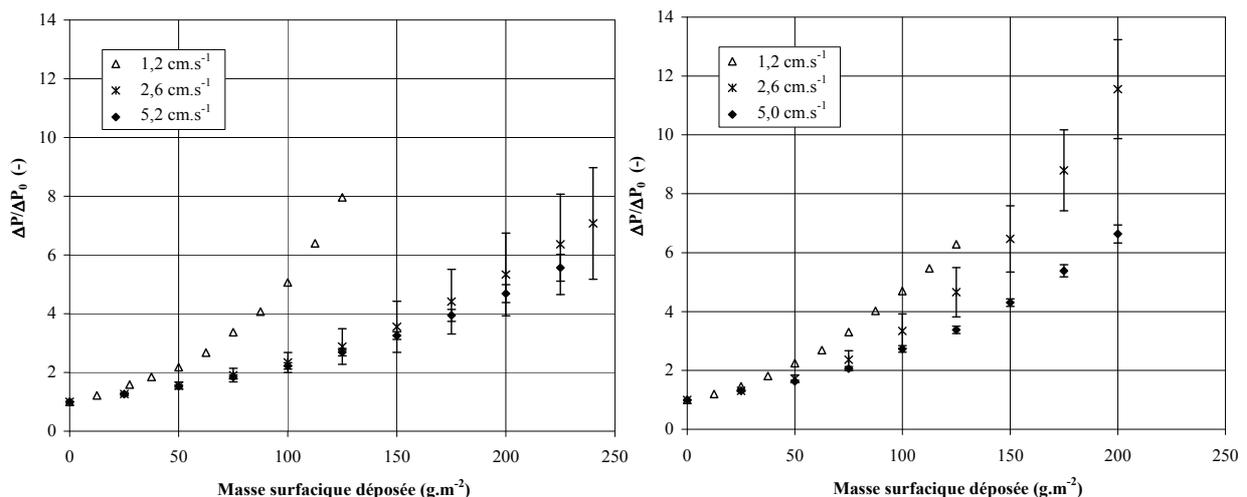


Figure 3–13 : Influence de la vitesse de filtration sur l'évolution de la perte de charge de filtres à petits plis colmatés par l'aérosol micronique d'alumine pour deux différents taux d'humidité relative : à gauche HR<10 % et à droite HR=95 %

Pour la gamme de vitesses de filtration étudiée comprise entre 1,2 et 5,2 cm.s<sup>-1</sup>, les résultats indiquent que le rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  est plus important, pour une même masse de particules déposées, lorsque la vitesse de filtration diminue par rapport à la vitesse nominale ; l'écart est néanmoins plus important en air sec qu'en air humide.

Ces observations confirment celles de Del Fabbro (2001) faites en air sec. Selon cet auteur, il peut exister deux explications à ce phénomène déjà énoncées précédemment (Cf. § II.2.2 b du chapitre 1) : la première, d'ordre mécanique, suggère que l'augmentation de la vitesse de filtration entraîne un meilleur écartement des plis les uns par rapport aux autres et retarde ainsi la réduction de la surface de filtration ; la seconde concerne le dépôt des particules qui se ferait préférentiellement dans le creux des plis à forte vitesse de filtration grâce à l'inertie des particules, et le long des plis à faible vitesse créant ainsi une obturation des plis plus rapide qu'à forte vitesse.

La présence d'humidité (à vitesse donnée) et la diminution de la vitesse de filtration (à taux d'humidité donné) ont donc le même effet sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé, à savoir une augmentation du rapport des pertes de charge pour une même masse de particules déposées. Ainsi, l'effet de l'augmentation de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge du filtre est plus significatif à la vitesse nominale de filtration qu'à faible vitesse de filtration, où la présence d'humidité influence peu l'évolution de la perte de charge du filtre déjà très importante (hormis pour un taux d'humidité relative de 100 % où la présence d'humidité est sensible).

### II.3.2. Aérosol submicronique de chlorure de sodium

Selon Pénicot *et al.* (1999), la vitesse de filtration n'influe pas sur la résistance spécifique d'un gâteau de particules submicroniques ; ainsi, l'influence de la vitesse de filtration sur l'évolution de la perte de charge de filtres plans durant leur colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium n'a pas été étudiée durant ces travaux.

Concernant les filtres plissés, l'influence de la vitesse de filtration sur l'évolution de leur perte de charge a été étudiée pour deux taux d'humidité relative d'environ 5 et 20 %. Les résultats sont présentés sur la figure 3-14.

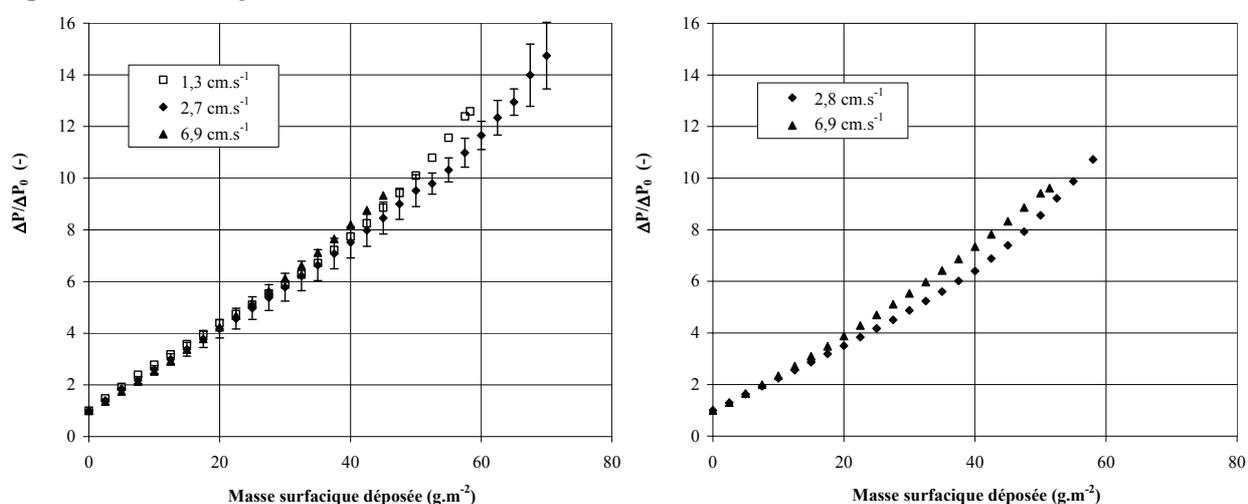


Figure 3-14 : Influence de la vitesse de filtration sur l'évolution de la perte de charge de filtres à petits plis colmatés par l'aérosol submicronique de chlorure de sodium pour deux différents taux d'humidité relative : à gauche HR=5 % et à droite HR=20 %

En air sec tout d'abord, les résultats indiquent qu'il n'y a pas d'effet de la vitesse de filtration, pour la gamme d'étude comprise entre 1,3 et 6,9 cm.s<sup>-1</sup>, sur l'évolution du rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  des filtres plissés ; la

même observation peut être faite pour un taux d'humidité relative de l'air durant le colmatage d'environ 20 %.

Les résultats sont différents de ceux obtenus avec l'aérosol micronique d'alumine. En effet, pour les particules submicroniques, le dépôt se fait de façon beaucoup plus homogène sur toute la hauteur du pli puisque les particules suivent les lignes de courant. La structure dendritique du dépôt observée pour une telle granulométrie de particules, l'importante surface spécifique des particules ainsi que l'homogénéité du dépôt le long des plis entraînent une plus grande résistance à l'écoulement qu'avec des particules microniques.

Les résultats sont également différents de ceux obtenus dans les études de Callé-Chazelet *et al.* (2008 a) à l'échelle de quelques plis avec un aérosol d'uranine et de Briand *et al.* (1998) avec un filtre industriel et des aérosols de chlorure de sodium submicroniques de tailles différentes. Ces différents résultats témoignent de la complexité du phénomène de colmatage et mettent en évidence l'influence du couplage, non encore maîtrisé à ce jour, entre les conditions d'écoulement au niveau d'un filtre plissé (vitesse de filtration, géométrie, orientation du flux d'air à l'entrée du filtre) et les caractéristiques de l'aérosol (nature, diamètre).

## II.4. Comparaison entre les colmatages sur filtres plans et plissés

### II.4.1. Aérosol micronique non-hygroscopique d'alumine

La figure 3–15 représente sur le même graphique l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé et celle d'un filtre plan, colmatés dans des conditions voisines de température, d'humidité relative et de vitesse de filtration, avec l'aérosol non hygroscopique d'alumine et pour trois taux d'humidité relative compris entre 5 et 100 %. L'écart entre les vitesses de filtration pour les filtres plans et plissés, respectivement de  $4,0 \text{ cm.s}^{-1}$  et  $2,6 \text{ cm.s}^{-1}$ , étant faible, les différences de comportement sont négligeables.

Les résultats indiquent que quel que soit le taux d'humidité relative, il existe une zone où les rapports  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  des filtres plans et plissés sont confondus ; cette zone, correspondant à la filtration en surface, s'étend de quelques  $\text{g.m}^{-2}$  à quelques dizaines de  $\text{g.m}^{-2}$  et elle est d'autant plus réduite que l'humidité relative de l'air est grande. Au-delà, l'écart entre les deux courbes d'évolution est d'autant plus grand que l'humidité relative de l'air est importante. L'augmentation importante de la perte de charge d'un filtre plissé durant son colmatage, par rapport à celle d'un filtre plan, est principalement due à la réduction de sa surface de filtration entraînant un accroissement des vitesses d'écoulement au sein du filtre. Ainsi, cela confirme que la présence d'humidité conduit à une plus grande réduction de la surface de filtration du filtre plissé, pour une même masse de particules déposées.

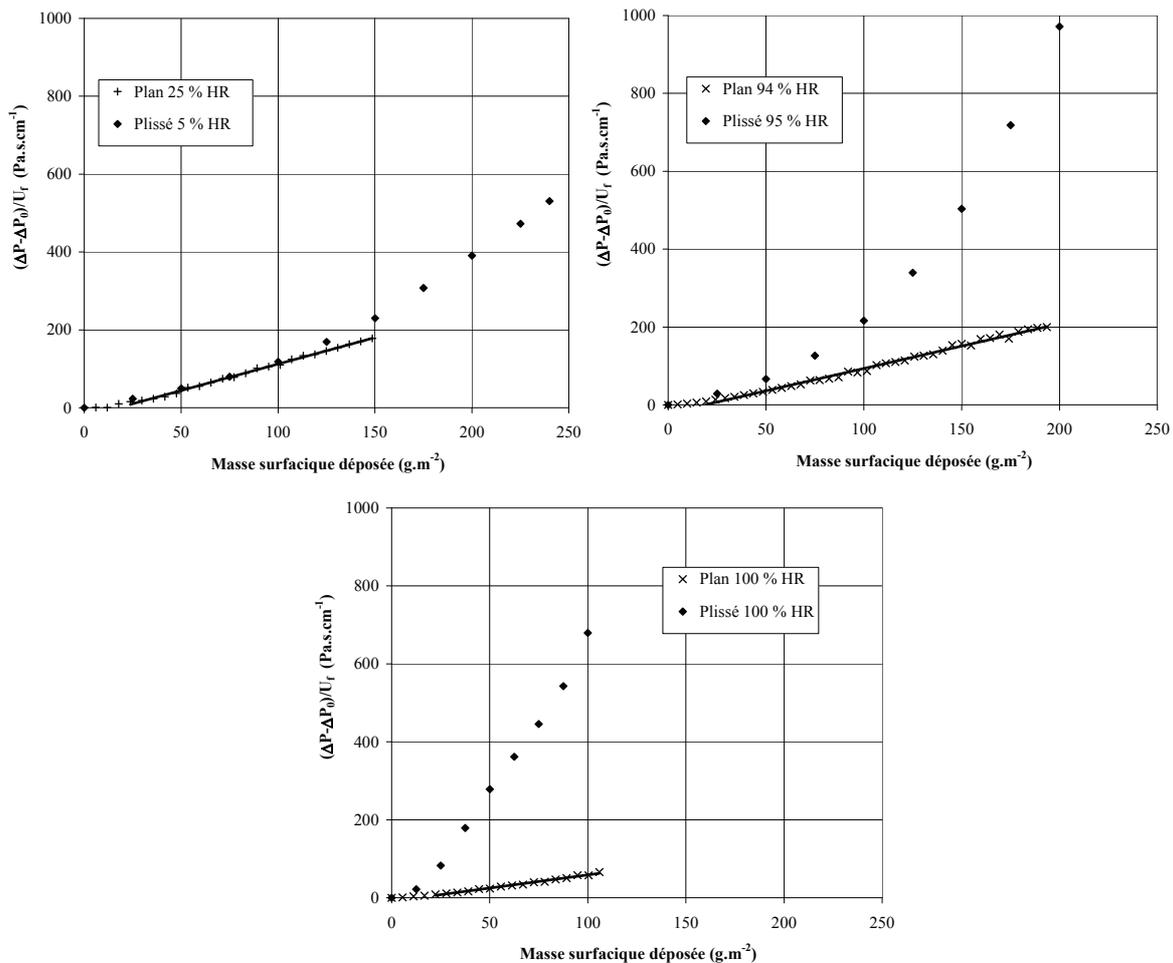


Figure 3–15 : Influence de la géométrie plane ou plissée d'un filtre sur l'évolution de sa perte de charge durant son colmatage avec l'aérosol micronique d'alumine pour trois taux d'humidité relative : 5-25 %, 94-95 % et 100 %

## II.4.2. Aérosol submicronique hygroscopique de chlorure de sodium

Le même type de comparaison a été effectué avec l'aérosol submicronique de chlorure de sodium pour des taux d'humidité relative inférieurs au point de déliquescence. La figure 3–16 représente les courbes d'évolution de la perte de charge des filtres plans et plissés pour quatre taux d'humidité relative compris entre 5 et 60 % ; les vitesses de filtration sont de  $7 \text{ cm.s}^{-1}$  pour les filtres plans et de  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$  pour les filtres plissés.

Comme pour l'aérosol d'alumine, quel que soit le taux d'humidité relative il existe une zone en termes de masse surfacique de particules déposées, d'autant plus réduite que l'humidité relative de l'air est grande, où les rapports  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  des filtres plans et plissés sont confondus (zone de filtration en

surface). Il convient de préciser que pour les deux taux d'humidité relative les plus faibles (5-10 % et 34-35 %), la courbe d'évolution de la perte de charge du filtre plan se situe légèrement au-dessus de celle du filtre plissé ; les courbes sont néanmoins considérées comme confondues compte tenu des incertitudes liées notamment à la faible masse de particules déposées sur les filtres plans, qui est inférieure à 2 g dans les deux cas.

Puis, au-delà d'une certaine masse de particules collectées, la perte de charge des filtres plissés devient plus importante à cause de la réduction de la surface de filtration ; en effet, les courbes d'évolution de la perte de charge des filtres plans poursuivant théoriquement leur augmentation de façon linéaire, elles doivent se situer en dessous de celles des filtres plissés.

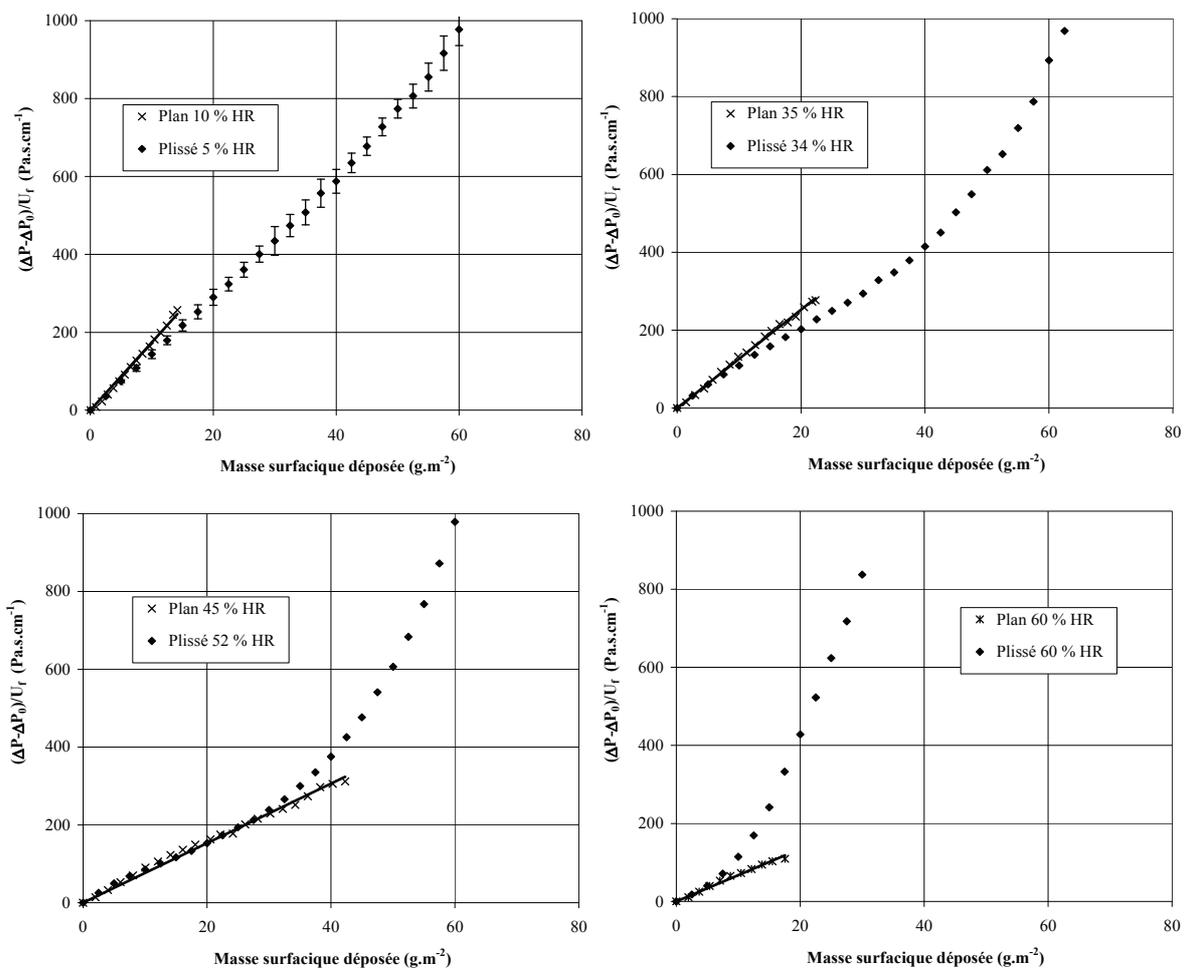


Figure 3–16 : Influence de la géométrie plane ou plissée d'un filtre sur l'évolution de sa perte de charge durant son colmatage avec l'aérosol submicronique de chlorure de sodium pour quatre taux d'humidité relative : 5-10 %, 34-35 %, 45-52 % et 60 %

La figure 3–17 représente les masses surfaciques limites de particules déposées, pour lesquelles les courbes d'évolution de la perte de charge des filtres plissés ne sont plus linéaires, en fonction de l'humidité relative de l'air pour les deux aérosols étudiés.

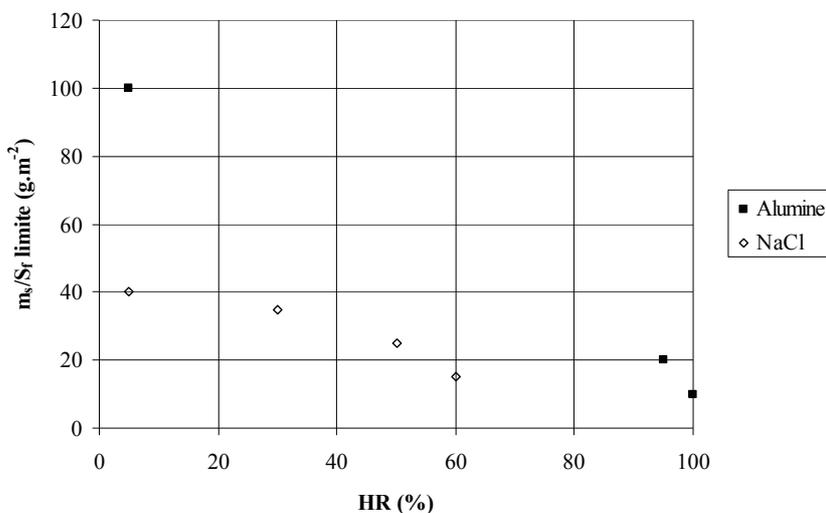


Figure 3–17 : Comparaison des masses surfaciques limites de particules déposées sur les filtres plissés en fonction de l'humidité relative du colmatage pour les aérosols d'alumine et de chlorure de sodium

## II.5. Evolution des paramètres hygrométriques et des masses d'eau adsorbées

Le choix de la grandeur à utiliser pour exprimer l'humidité, comme l'humidité relative ou le rapport de mélange, dépend de ce qui doit être mesuré (écart à la saturation ou quantité de vapeur). Or, les deux grandeurs citées n'évoluent pas de façon linéaire entre elles. En effet, le rapport de mélange augmente de façon exponentielle avec l'humidité relative lorsque celle-ci est proche de la saturation ; ainsi, les résultats sont exprimés selon les cas en fonction du rapport de mélange ou de l'humidité relative de l'air.

### II.5.1. Evolution des masses d'eau adsorbée

La masse d'eau adsorbée par les filtres plans et plissés durant leur colmatage avec les aérosols d'alumine et de chlorure de sodium a été déterminée. Les résultats sont représentés à l'aide du rapport entre la masse d'eau adsorbée et la masse d'aérosol déposé sur le filtre en fonction de l'humidité à laquelle a eu lieu le colmatage. L'adsorption de vapeur par le medium filtrant étant négligeable (Cf. § IV.2.2 du chapitre 1), la masse d'eau retenue par le filtre se situe au niveau de l'aérosol et donc du gâteau de particules.

La figure 3–18 et la figure 3–19 rassemblent l'ensemble des résultats obtenus respectivement pour l'aérosol d'alumine et pour celui de chlorure de sodium en fonction du rapport de mélange et de l'humidité relative de l'air ; pour l'aérosol d'alumine, la figure 3–18 présente également quelques valeurs de l'isotherme de sorption à 25 °C de l'eau par un tas de poudre d'alumine déterminée à l'aide d'une balance de sorption par le Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (Callé-Chazelet *et al.*, 2008 b). Pour l'aérosol de chlorure de sodium, la figure 3–20 rassemble une partie des valeurs présentées sur la figure précédente mais pour des plages d'humidité relative et de rapport de mélange plus restreintes ne comprenant pas les valeurs au-delà du point de déliquescence de l'aérosol.

Pour l'aérosol d'alumine, les résultats indiquent que la quantité d'eau retenue par masse d'aérosol collecté est constante et négligeable jusqu'à un rapport de mélange d'environ 17  $g.kg^{-1}_{as}$  (as : air sec) ou une humidité relative de 80 %, puis augmente en fonction de l'humidité. Ce résultat est à corrélérer avec celui de l'influence de l'humidité sur les courbes d'évolution de la perte de charge des filtres qui ne devient significative qu'à partir d'une humidité relative d'environ 80 % (Cf. figure 3–8). Les résultats provenant des isothermes de sorption à 25 °C sont du même ordre de grandeur que les valeurs issues des colmatages de filtres.

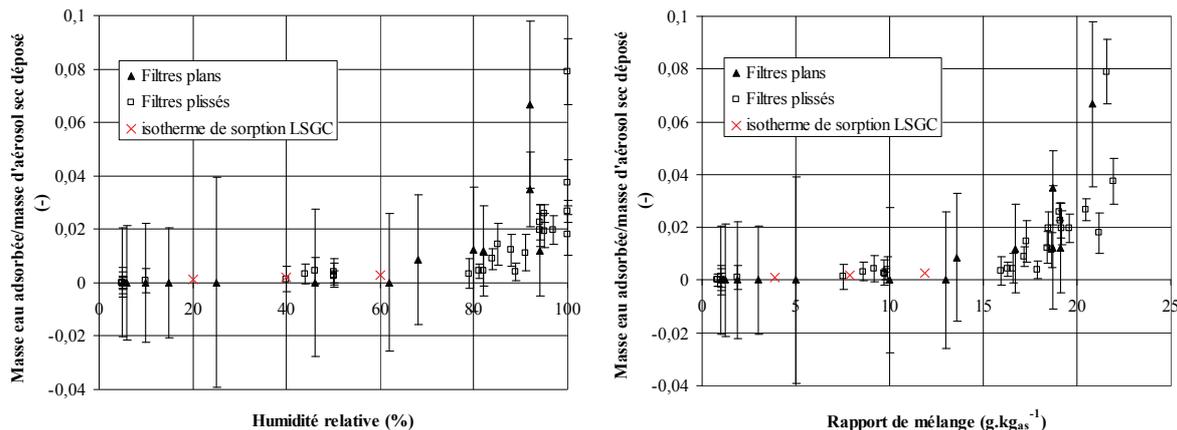


Figure 3–18 : Rapport entre la masse d'eau adsorbée sur le filtre et la masse d'aérosol collecté en fonction de l'humidité relative (à gauche) et du rapport de mélange (à droite) durant les colmatages sur filtres plans et plissés par l'aérosol non-hygroscopique d'alumine

Pour l'aérosol de chlorure de sodium, seuls les résultats issus des colmatages avec les filtres plissés sont présentés en raison des faibles masses d'aérosol mises en jeu lors des colmatages des filtres plans et donc de la trop importante incertitude associée. Les résultats (Cf. figure 3–20) montrent qu'entre 5 et 70 % d'humidité relative, ou encore pour des rapports de mélange compris entre 1 et 14 g.kg<sup>-1</sup><sub>as</sub>, la quantité d'eau retenue par masse d'aérosol collecté augmente jusqu'à une valeur de 1,7 % ; il y a donc une adsorption de la vapeur d'eau par les particules de chlorure de sodium dans cette gamme d'humidité. Pour des taux d'humidité relative supérieurs, le rapport augmente de façon très importante, ce qui tend à confirmer que l'aérosol est bien sous forme liquide puisqu'il a dépassé son point de déliquescence.

De façon plus détaillée, trois zones, identiques à celles observées sur la figure 3–10, peuvent se distinguer en fonction de l'humidité relative :

- en dessous de 50 % d'humidité relative : la quantité d'eau retenue par masse d'aérosol collecté augmente légèrement (en particulier entre 5 et 20 % d'humidité relative),
- entre 60 et 70 % d'humidité relative : la quantité d'eau retenue par masse d'aérosol collecté augmente de façon plus importante, conformément à l'isotherme d'adsorption de la vapeur d'eau par les particules de chlorure de sodium observée par Foster et Ewing (1999) et représentée sur la figure 1–24 (Cf. § IV.3.2 c du chapitre 1),
- au-delà de 75 % d'humidité relative : la quantité d'eau retenue par masse d'aérosol collecté atteint près de 60 % et augmente avec l'humidité relative.

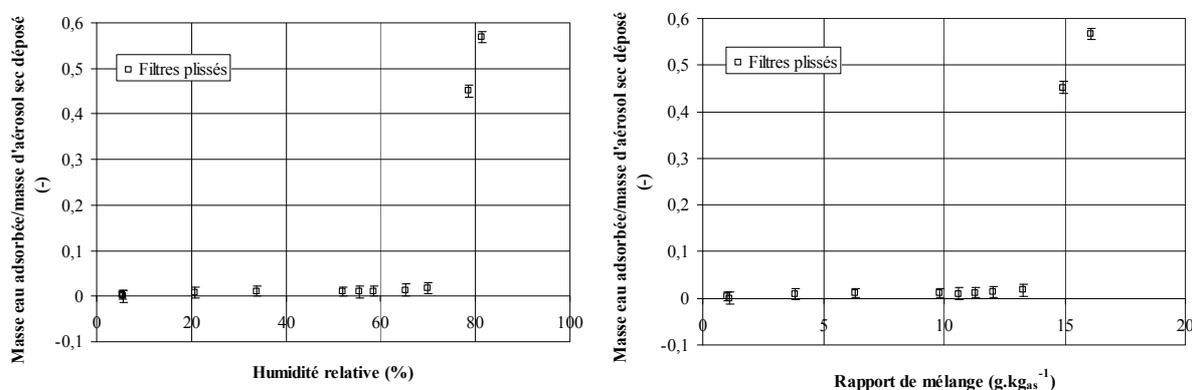


Figure 3–19 : Rapport entre la masse d'eau adsorbée sur le filtre et la masse d'aérosol collecté en fonction de l'humidité relative (à gauche) et du rapport de mélange (à droite) durant les colmatages de filtres plissés par l'aérosol hygroscopique de chlorure de sodium

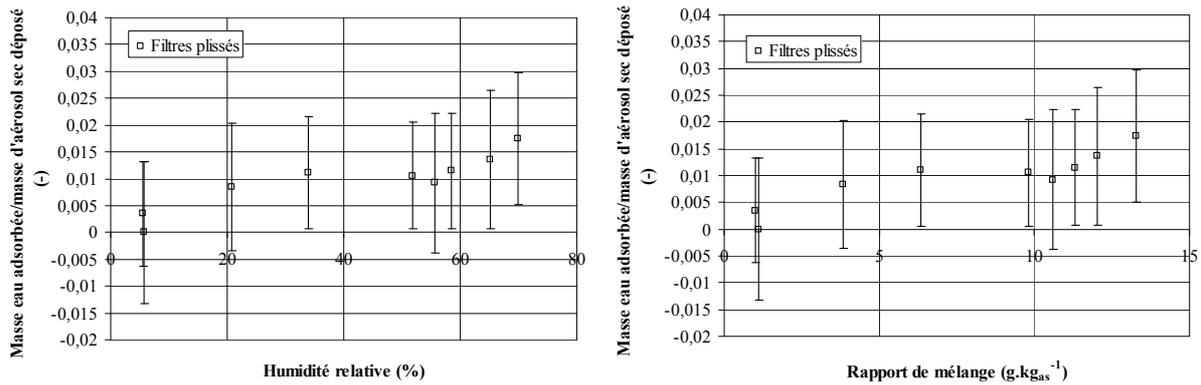


Figure 3–20 : Rapport entre la masse d'eau adsorbée sur le filtre et la masse d'aérosol collecté en fonction de l'humidité relative entre 5 et 70 % (à gauche) et du rapport de mélange entre 1 et 14  $\text{g.kg}_{\text{as}}^{-1}$  (à droite) durant les colmatages de filtres plissés par l'aérosol hygroscopique de chlorure de sodium

### II.5.2. Evolution des humidités en amont et en aval du filtre

L'humidité relative en amont et en aval du filtre est mesurée en continu durant tout le colmatage. Le paragraphe précédent a montré que durant le colmatage, une quantité de vapeur d'eau plus ou moins importante selon l'humidité de l'air est adsorbée sur le filtre. Ainsi, l'humidité de l'air en aval du filtre doit diminuer au cours du colmatage.

Les résultats d'évolution des paramètres hygrométriques sont exprimés à l'aide du rapport  $\frac{r_{\text{amont}} - r_{\text{aval}}}{r_{\text{amont}}}$  défini à partir des rapports de mélange en amont et en aval du filtre puisque c'est la quantité de vapeur d'eau qui est ici le paramètre pertinent.

La figure 3–21 représente l'évolution des rapports  $\frac{r_{\text{amont}} - r_{\text{aval}}}{r_{\text{amont}}}$  durant les colmatages de filtres plissés avec l'aérosol d'alumine et de chlorure de sodium pour différents taux d'humidité relative compris respectivement entre 5 et 100 % et entre 5 et 80 %.

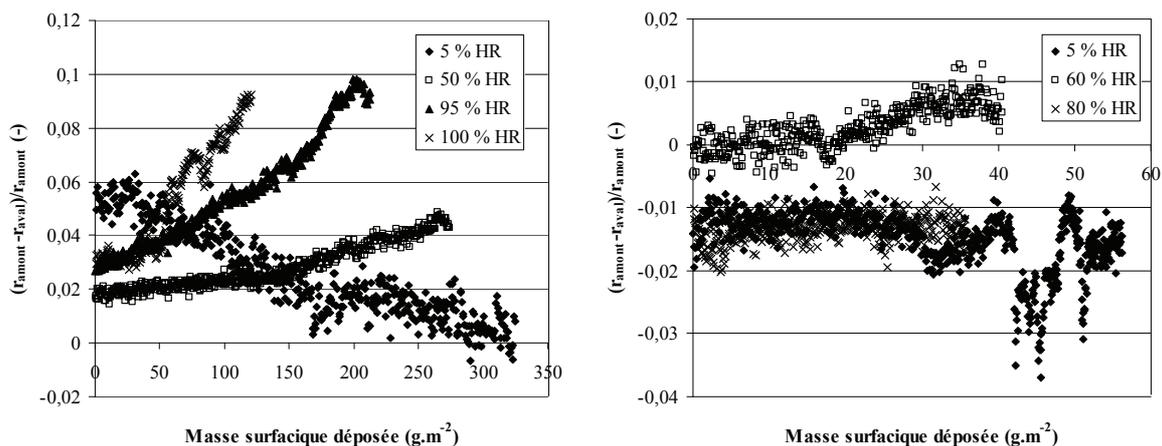


Figure 3–21 : Evolutions du rapport de mélange en aval du filtre normé avec celui en amont du filtre en fonction de la masse surfacique de particules déposées d'alumine (à gauche) et de chlorure de sodium (à droite), pour différents taux d'humidité relative

Pour l'aérosol d'alumine, les résultats révèlent que le rapport  $\frac{r_{\text{amont}} - r_{\text{aval}}}{r_{\text{amont}}}$  évolue tout au long du colmatage. Durant le colmatage à 5 % d'humidité relative, les résultats montrent que le rapport  $\frac{r_{\text{amont}} - r_{\text{aval}}}{r_{\text{amont}}}$  diminue en fonction de la masse surfacique de particules collectées. Cela signifie donc qu'au cours du colmatage, l'air est plus humide en aval du filtre. Cette observation, qui s'est vérifiée sur l'ensemble des colmatages effectués autour de 5 % d'humidité relative, s'explique par une diminution de l'humidité relative de l'air en amont du filtre durant le colmatage ; cette baisse de l'humidité relative peut être engendrée par un séchage des particules d'alumine et du filtre qui, avant l'essai, sont à température et humidité ambiantes. Durant les colmatages à des taux d'humidité plus importants, les résultats indiquent que le rapport  $\frac{r_{\text{amont}} - r_{\text{aval}}}{r_{\text{amont}}}$  augmente au cours du colmatage. Cette augmentation s'explique par l'adsorption de vapeur d'eau au niveau du filtre. L'allure des courbes est également intéressante. En effet, il apparaît que l'augmentation du rapport  $\frac{r_{\text{amont}} - r_{\text{aval}}}{r_{\text{amont}}}$  n'est pas linéaire dans le temps mais suit l'allure des courbes d'évolution de la perte de charge des filtres plissés qui dépend de la réduction de la surface de filtration.

Pour l'aérosol de chlorure de sodium, les résultats révèlent que le rapport  $\frac{r_{\text{amont}} - r_{\text{aval}}}{r_{\text{amont}}}$  est constant durant tout le colmatage quelle que soit l'humidité relative à laquelle il a été effectué. Ceci peut s'expliquer par le fait que les taux d'humidité relative sont restés plus stables durant les colmatages. Les incertitudes associées à la mesure du rapport de mélange avec les hygromètres capacitifs et à la mesure de la masse de vapeur adsorbée sur le filtre, ainsi que les variations de température observées durant les essais, n'ont pas permis d'effectuer des bilans massique d'eau (et notamment de vapeur) au niveau du filtre.

### Bilan

*Cette partie a présenté l'ensemble des résultats expérimentaux d'évolution de la perte de charge de filtres plans et plissés durant leur colmatage sous humidité avec l'aérosol non-hygroscopique d'alumine et l'aérosol hygroscopique de chlorure de sodium. Les résultats ont mis en évidence, d'une part l'influence de l'hygroscopicité de l'aérosol conformément aux résultats de Gupta et al. (1993), d'autre part l'influence de la géométrie plane ou plissée du filtre. De façon générale, le colmatage sous humidité par un aérosol non-hygroscopique ou un aérosol hygroscopique en dessous de son point de déliquescence conduit, pour un filtre plan à une baisse de la résistance spécifique du gâteau de particules, pour un filtre plissé à une fermeture plus rapide des plis et donc à une plus grande perte de charge ; avec un aérosol hygroscopique au-dessus de son point de déliquescence, l'évolution de la perte de charge d'un filtre plan ou plissé est caractéristique d'un colmatage avec un aérosol liquide. L'étude des masses d'eau transférées durant les colmatages a mis en évidence une adsorption de la vapeur d'eau par les particules déposées sur le filtre qui apparaît à partir de 80 % d'humidité relative pour les particules d'alumine et dès 20 % pour les particules de chlorure de sodium, puis augmente avec l'humidité relative.*

*Dans la prochaine partie de ce paragraphe, différentes méthodes sont employées afin de tenter de caractériser le dépôt des particules sous humidité et ainsi d'apporter des explications aux résultats obtenus.*

### III. CARACTERISATION DU DEPOT DES PARTICULES SOUS HUMIDITE

#### III.1. Géométrie du dépôt des particules pour les filtres plans

Selon Gupta *et al.* (1993), l'effet de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre plan, déjà énoncé au § V.2 du chapitre 1, peut être attribué à une augmentation des forces d'adhésion entre les particules lorsque l'humidité relative de l'air augmente. Ainsi, durant la formation du gâteau, les particules ont tendance à s'agglomérer entre elles plutôt qu'à remplir les espaces interstitiels. Le gâteau formé a donc une structure plus aérée et donc une perte de charge plus faible pour une même masse de particules collectées.

Des observations de la surface des filtres plans, après leur colmatage, ont été effectuées à l'aide d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB) au Laboratoire des Sciences du Génie Chimique de Nancy afin de confirmer l'hypothèse de Gupta *et al.* (1993). Les clichés correspondent à des vues de face amont des filtres colmatés. Il est important de préciser que l'humidité relative n'a pas pu être maîtrisée pendant le stockage et le transport des filtres ; ainsi, les conclusions apportées à l'issue des observations des clichés au MEB doivent être relativisées.

##### III.1.1. Air sec

La figure 3–22 représente plusieurs clichés au MEB de la surface de deux filtres après leur colmatage en air sec (HR < 10 %) avec les aérosols d'alumine et de chlorure de sodium étudiés.

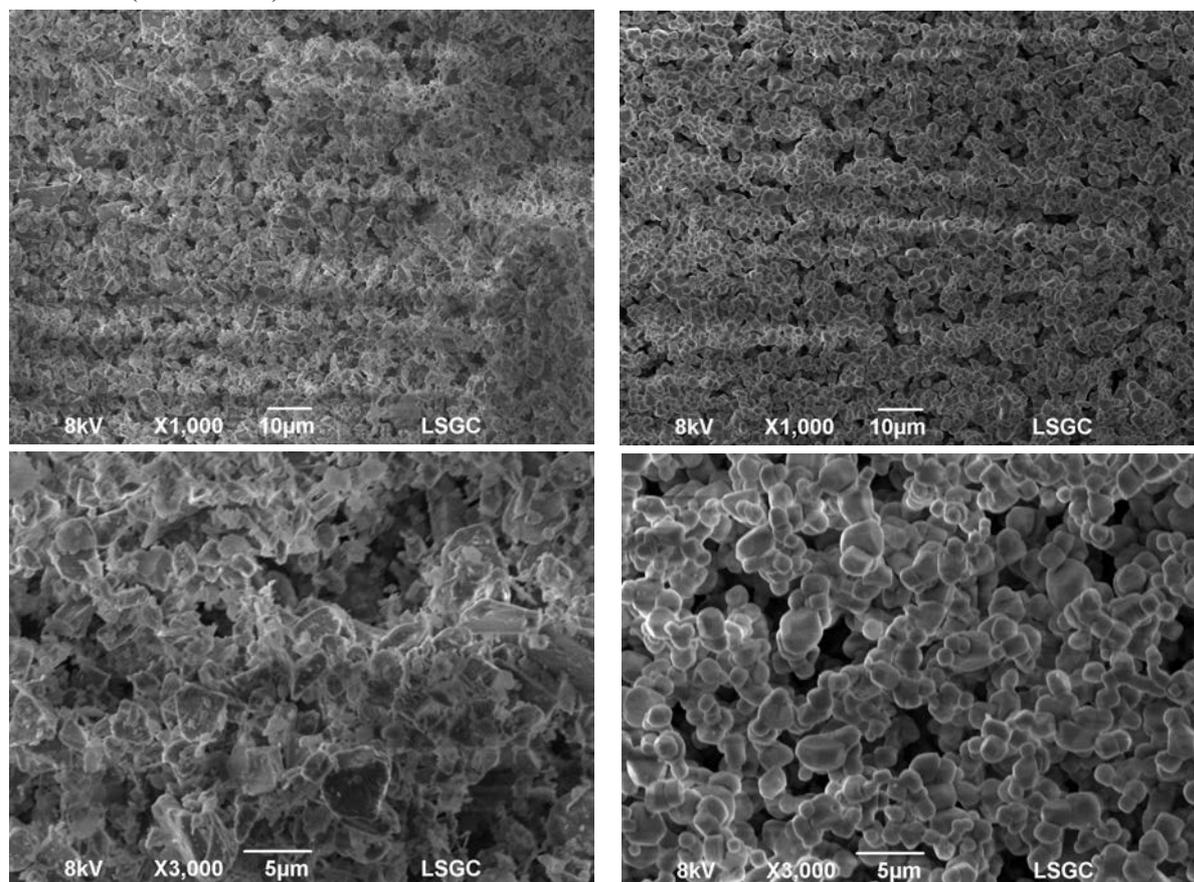


Figure 3–22 : Photographies au MEB du dépôt de particules à la surface de filtres THE plans colmatés en air sec : à gauche avec de l'alumine ( $200 \text{ g.m}^{-2}$ ) et à droite avec du chlorure de sodium ( $23 \text{ g.m}^{-2}$ )

Selon Thomas (2001), en air sec, le dépôt des particules microniques d'alumine se fait sous forme d'agglomérats, et celui des particules submicroniques de chlorure de sodium sous forme de dendrites. L'observation des clichés permet de confirmer que le dépôt formé de particules d'alumine a une plus grande compacité que celui formé de particules de chlorure de sodium. La géométrie dendritique ou sous forme d'agglomérats est plus difficile à apprécier avec une vue de dessus du filtre mais peut néanmoins être distinguée.

### III.1.2. Air humide

#### a. Filtration en profondeur

La figure 3–23 représente deux clichés au MEB de la surface de deux filtres colmatés en profondeur avec l'aérosol de chlorure de sodium à deux taux d'humidité relative différents de 5 et 45 % et pendant la même durée de filtration (7 min) correspondant à une masse surfacique de particules déposées d'environ  $1 \text{ g.m}^{-2}$ .

L'observation des clichés semble montrer qu'à 45 % d'humidité relative, les particules de chlorure de sodium ont tendance à s'agglomérer davantage entre elles qu'à 5 % d'humidité relative. En effet, il semble qu'il y ait plus de particules isolées le long des fibres à la surface du filtre colmaté à 5 % qu'à celle du filtre colmaté en air plus humide. Ceci s'explique par le fait que la présence d'humidité augmente les forces d'adhésion entre les particules, en particulier par l'apparition des forces de capillarité.

Aucun cliché de filtre colmaté en profondeur avec l'aérosol d'alumine n'a été fait, eu égard à l'important débit massique d'aérosol généré.

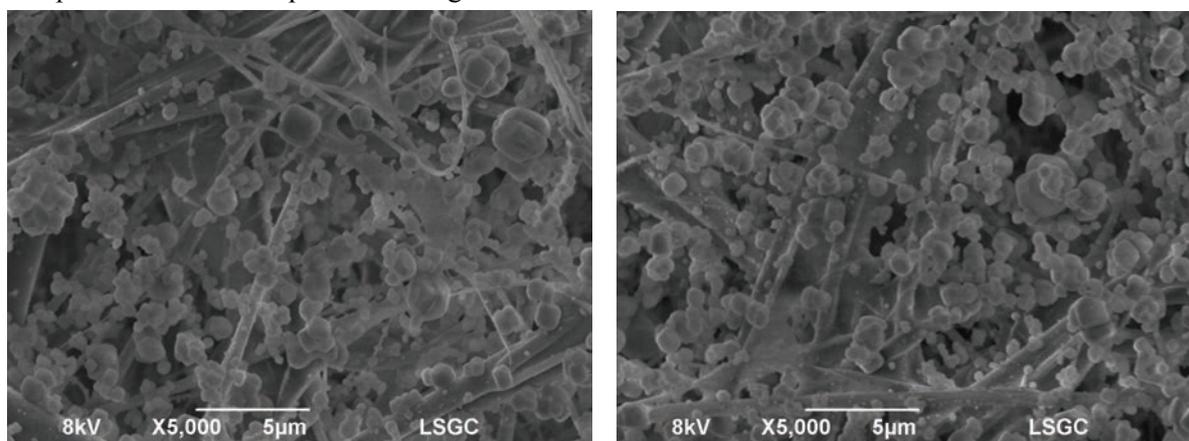


Figure 3–23 : Photographies au MEB du dépôt de particules de chlorure de sodium en profondeur pour deux filtres colmatés à deux taux d'humidité relative différents : à gauche à 5 % et à droite à 45 %

#### a. Filtration en surface

La figure 3–24 représente deux clichés au MEB de la surface de deux filtres colmatés avec l'aérosol d'alumine à deux taux d'humidité relative différents de 5 % et de près de 100 %.

L'observation des clichés pris de la surface des filtres colmatés à l'alumine en air sec et en air très humide ne permet pas de conclure quant à l'influence de l'humidité sur l'arrangement des particules.

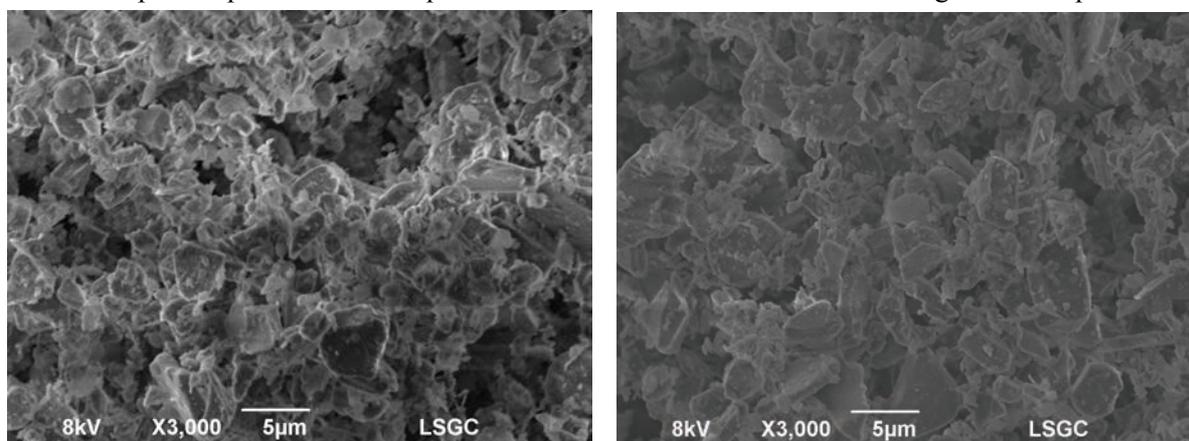


Figure 3–24 : Photographies au MEB du dépôt de particules d'alumine en surface de deux filtres colmatés à deux taux d'humidité relative différents : à gauche à 5 % ( $200 \text{ g.m}^{-2}$ ) et à droite à 100 % ( $200 \text{ g.m}^{-2}$ )

La figure 3–25 représente des clichés au MEB de la surface de trois filtres colmatés avec l'aérosol de chlorure de sodium à 5, 45 et 60 % d'humidité relative. Plusieurs tendances semblent se dégager, même si les clichés correspondant à des vues de dessus des filtres sont encore une fois difficiles à interpréter.

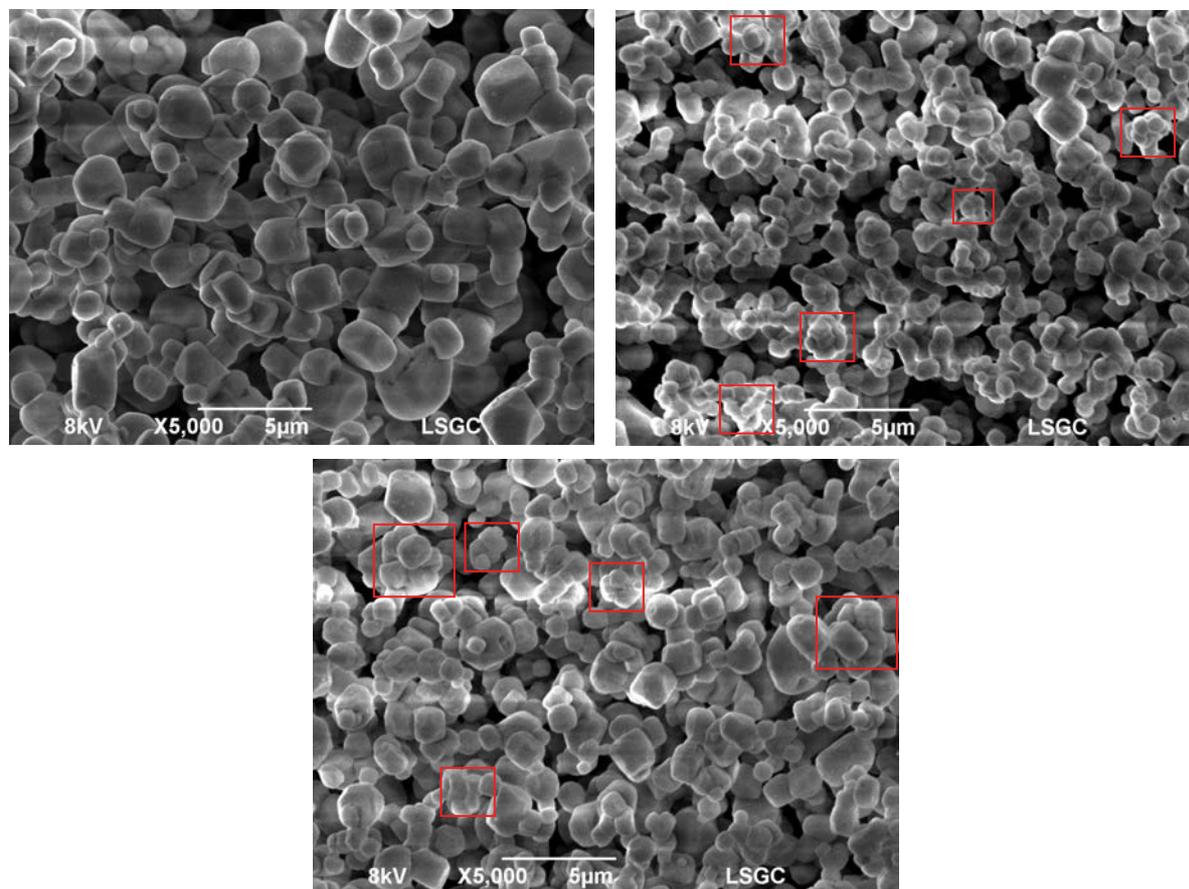


Figure 3–25 : Photographies au MEB du dépôt en surface de particules de chlorure de sodium de filtres colmatés à différents taux d'humidité relative : en haut à gauche à 5 % ( $23 \text{ g.m}^{-2}$ ), en haut à droite à 45 % ( $23 \text{ g.m}^{-2}$ ) et en bas à 60 % ( $18 \text{ g.m}^{-2}$ )

Tout d'abord, les clichés confirment que la granulométrie de l'aérosol est plus fine à 45 et 60 % d'humidité relative qu'à 5 % ; il est important de préciser que la diminution du diamètre des particules en suspension dans l'air ne saurait être à l'origine de l'influence de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge des filtres puisque cela conduirait à un colmatage plus important de ces derniers.

Concernant l'influence de l'humidité sur le dépôt des particules, les clichés mettent en évidence que les particules adhèrent davantage entre elles lorsque l'humidité de l'air durant le colmatage est élevée. En effet, le dépôt à la surface des filtres forme principalement des dendrites, mais pour les filtres colmatés à 45 et 60 % d'humidité relative, en plus du réseau dendritique, de nombreux agglomérats de particules (certains sont encadrés sur les clichés) sont visibles. Or, la surface spécifique de plusieurs particules agglomérées est inférieure à la somme de la surface spécifique de chaque particule isolée. Ainsi, pour une même masse de particules collectées, un gâteau de particules formé sous humidité a une plus faible résistance à l'écoulement qu'un gâteau formé en air sec.

Ainsi, en considérant que la présence d'humidité a tendance à former des agglomérats de particules, cela permet d'expliquer pourquoi l'effet de l'humidité est plus marqué pour les fines particules (pour une même nature hygroscopique de particules Cf. § II.1.2 de ce chapitre). En effet, les particules microniques se déposant en air sec déjà sous forme d'agglomérats (Thomas, 2001), la présence d'humidité influe peu sur le dépôt des particules et donc peu sur la perte de charge du filtre ; pour les fines particules, le dépôt dendritique observé en air sec (Thomas, 2001) est à l'inverse plus sensible à la présence d'humidité.

### III.2. Evaluation de l'épaisseur des gâteaux de particules

L'épaisseur des gâteaux formés à la surface des filtres plans pendant leur colmatage a été évaluée par interférométrie à l'Université de Créteil. Ce paragraphe énonce le principe de mesure ainsi que les résultats obtenus pour les deux types d'aérosols.

#### III.2.1. Principe de la mesure

La technique de microscopie interférométrique en lumière blanche repose sur la mesure du relief de l'échantillon par l'intermédiaire de la détermination de la position, selon l'axe vertical, du maximum d'intensité des franges d'interférence (Brutt, 2007).

L'interféromètre utilise un faisceau lumineux divergent qui est divisé par une lame semi-réfléchissante en deux faisceaux partiels qui suivent différents chemins. Ces deux faisceaux partiels sont réfléchis puis de nouveau réunis par superposition sur un écran d'observation. Une image d'interférence est ainsi obtenue ; elle réagit avec sensibilité aux modifications de la distance optique du trajet d'un faisceau partiel, donc du produit résultant de l'indice de réfraction et de la longueur géométrique du trajet.

#### III.2.2. Méthodologie

Les mesures de l'épaisseur des gâteaux ont été déterminées différemment selon la nature des particules.

Pour l'alumine, le gâteau à la surface du medium étant suffisamment solide, la couche de gâteau à la surface du filtre a pu être prélevée ; une observation de la surface du filtre après avoir retiré la couche de gâteau a permis de s'assurer qu'il ne restait pas de particules en surface et que le medium n'avait pas été endommagé. Ainsi, les analyses interférométriques donnent accès directement à la valeur de l'épaisseur de gâteau. En effet, la valeur mesurée représente la différence de hauteur entre la couche de gâteau prélevée sur le filtre et le support en verre sur laquelle elle est déposée.

Pour le chlorure de sodium, le gâteau de particules à la surface des filtres est beaucoup plus friable. Ainsi, les mesures ont été faites à partir d'échantillons composés du gâteau et du medium filtrant. Des mesures d'épaisseur du medium filtrant vierge ont été effectuées afin de pouvoir déterminer, par soustraction, la valeur de l'épaisseur des gâteaux.

Dans les deux cas, plusieurs mesures ont été faites à différents endroits des filtres (au centre et dans les angles), afin de s'affranchir d'un éventuel dépôt hétérogène ; la valeur proposée d'épaisseur du gâteau constitue donc une valeur moyenne dont l'incertitude associée, correspondant à un intervalle de confiance à 95 %, prend en compte :

- l'évaluation de l'épaisseur à l'aide des spectres reconstitués de la surface (Cf. figure 3-26),
- les différentes valeurs en fonction de la position de l'échantillon à la surface du filtre.

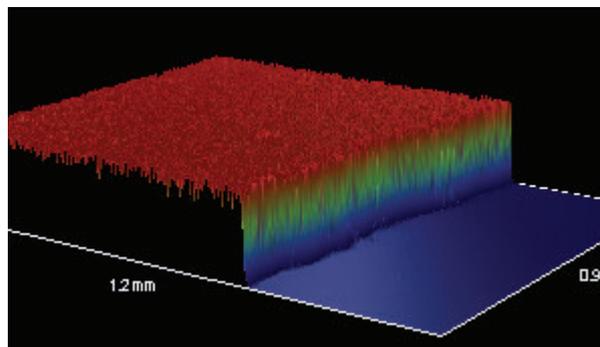


Figure 3-26 : Représentation par méthode interférométrique de l'épaisseur d'un gâteau de particules d'alumine

### III.2.3. Résultats

Le tableau 3–2 présente les résultats obtenus sur les filtres analysés ainsi que les conditions opératoires de colmatage des filtres ; une estimation de la compacité du gâteau, déterminée à partir de la relation (1–44), est également proposée (le calcul de l'incertitude associée est présenté dans l'ANNEXE IX). Pour ce calcul, la masse volumique des particules est supposée constante quel que soit le taux d'humidité relative. Deux valeurs de compacité sont proposées :  $\alpha_{g_h}$  calculée à partir de la masse humide de particules collectées en sortie du banc d'essais et  $\alpha_{g_s}$  déterminée avec la masse de particules collectées après étuvage des filtres ; les valeurs de compacité  $\alpha_{g, Pénicot}$  calculées avec la corrélation (1–45) de Pénicot-Bauge (1998) figurent également dans le tableau 3–2 à titre de comparaison.

Tableau 3–2 : Epaisseurs des gâteaux de particules d'alumine et de chlorure de sodium mesurées par interférométrie et compacités associées calculées

HR (%)	$e_g$ ( $\mu\text{m}$ )	$\alpha_{g_h}$ (-)	$\alpha_{g_s}$ (-)	$\alpha_{g, Pénicot}$ (-)
particules d'alumine				
25	203 ± 15	0,13 ± 0,07	0,11 ± 0,07	0,58
46	233 ± 23	0,14 ± 0,10	0,14 ± 0,10	0,58
62	282 ± 27	0,12 ± 0,10	0,12 ± 0,10	0,58
68	313 ± 24	0,12 ± 0,08	0,12 ± 0,08	0,58
82	406 ± 36	0,13 ± 0,09	0,13 ± 0,09	0,58
92	315 ± 31	0,12 ± 0,10	0,12 ± 0,10	0,58
94	410 ± 29	0,13 ± 0,07	0,13 ± 0,07	0,58
100	257 ± 29	0,12 ± 0,11	0,11 ± 0,11	0,58
particules de chlorure de sodium				
25	288 ± 29	0,04 ± 0,10	0,03 ± 0,10	0,39
35	114 ± 23	0,10 ± 0,20	0,08 ± 0,20	0,43
45	184 ± 40	0,12 ± 0,22	0,10 ± 0,22	0,39
60	196 ± 33	0,04 ± 0,17	0,03 ± 0,17	0,39

Les résultats indiquent que la compacité du gâteau évolue peu en fonction de l'humidité relative de l'air au cours du colmatage. Mais, l'importante incertitude associée aux résultats rend délicate une interprétation trop fine. Les résultats permettent néanmoins de mettre en évidence l'influence de la taille de l'aérosol sur la valeur de la compacité du gâteau de particules. En effet, conformément à l'étude bibliographique (Pénicot-Bauge, 1998), en air sec la compacité du gâteau est plus grande pour les particules microniques d'alumine que pour les particules submicroniques de chlorure de sodium. De plus, les valeurs obtenues sont beaucoup plus faibles que celles issues de la corrélation empirique de Pénicot-Bauge (1998). C'est vraisemblablement la polydispersion des aérosols qui est à l'origine des faibles valeurs de compacité mesurées.

### III.3. Résistances spécifiques des gâteaux de particules des filtres plans

Les différentes valeurs de résistances spécifiques expérimentales  $K_{2_{exp}}$  des gâteaux de particules d'alumine et de chlorure de sodium (en dessous de son point de déliquescence) obtenus sur les filtres plans pour les différents taux d'humidité relative sont regroupés respectivement dans le tableau 3-3 et le tableau 3-4 ; des estimations théoriques de  $K_{2_{poly,m}}$  sont également proposées à partir de la relation (1-43) et pour deux valeurs de compacité du gâteau :  $\alpha_{g,Péni\ cot}$  avec la corrélation empirique (1-45) de Pénicot-Bauge (1998) ou les valeurs  $\alpha_{g_h}$  déterminées expérimentalement et présentées au paragraphe précédent ; la valeur de la constante de Kozeny  $h_k$  est prise égale à 5.

Tableau 3-3 : Comparaison des résistances spécifiques expérimentales et théoriques des gâteaux de particules d'alumine à différents taux d'humidité relative

HR (%)	$U_f$ (cm.s <sup>-1</sup> )	$K_{2_{exp}}$ ( $\times 10^5$ s <sup>-1</sup> )	$K_{2_{poly,m}}$ ( $\times 10^5$ s <sup>-1</sup> )	$K_{2_{poly,m}}$ ( $\times 10^5$ s <sup>-1</sup> )
			avec $\alpha_{g,Péni\ cot}$	avec $\alpha_{g_h}$
25	3,7	1,1	31,9	0,8 ± 0,1
46	4,0	1,1	31,9	0,9 ± 0,1
62	3,7	1,1	31,9	0,7 ± 0,1
68	4,0	1,1	31,9	0,7 ± 0,1
82	4,4	1,2	31,9	0,8 ± 0,1
92	3,9	1,0	39,2	0,9 ± 0,1
94	4,0	1,1	39,2	1,0 ± 0,1
100	3,8	0,6	39,2	0,9 ± 0,1
5	15,6	1,9	31,9	-
5	6,2	1,5	31,9	-
10	11,0	1,6	31,9	-
92	8,5	1,6	39,2	-

Tableau 3-4 : Comparaison des résistances spécifiques expérimentales et théoriques des gâteaux de particules de chlorure de sodium à différents taux d'humidité relative

HR (%)	$U_f$ (cm.s <sup>-1</sup> )	$K_{2_{exp}}$ ( $\times 10^5$ s <sup>-1</sup> )	$K_{2_{poly,m}}$ ( $\times 10^5$ s <sup>-1</sup> )	$K_{2_{poly,m}}$ ( $\times 10^5$ s <sup>-1</sup> )
			avec $\alpha_{g,Péni\ cot}$	avec $\alpha_{g_h}$
10	7,0	17,4	677,3	-
25	6,8	13,5	549,0	14,1 ± 1,4
35	6,8	12,6	476,2	29,2 ± 6,0
45	7,6	7,6	549,0	55,0 ± 12,7
60	7,1	6,7	549,0	14,1 ± 2,4
70	6,9	4,0	549,0	-

Le calcul des incertitudes associées aux valeurs de  $K_{2_{poly,m}}$  calculées avec  $\alpha_{g_h}$  figure dans l'ANNEXE IX.

Pour les deux aérosols, les résultats révèlent qu'en air sec, l'utilisation de la relation (1-43) avec une valeur de compacité estimée avec la corrélation de Pénicot-Bauge (1998) et le diamètre aérodynamique médian massique  $\tilde{d}_{ae,m}$  de l'aérosol, surestime fortement la valeur de  $K_{2,exp}$ . La polydispersion des particules peut être à l'origine de cet écart. Une meilleure estimation de  $K_{2,exp}$  est obtenue avec les valeurs de compacité déterminées expérimentalement.

Concernant l'influence de l'humidité relative, celle-ci intervient dans le calcul de la résistance spécifique au niveau :

- de la viscosité dynamique de l'air,
- du diamètre de l'aérosol (la masse volumique des particules est supposée constante quelle que soit l'humidité de l'air).

Les résultats indiquent que le calcul théorique de la résistance spécifique ne permet pas de rendre compte des évolutions expérimentales obtenues en fonction de l'humidité relative. Cela signifie que l'humidité joue un rôle au niveau de l'arrangement des particules et de la structure même du gâteau de particules dont les seules mesures d'épaisseur par interférométrie ne rendent pas compte.

### III.4. Dépôt des particules au niveau des plis

Une observation de la surface frontale des filtres plissés en fin de colmatage permet d'appréhender la façon dont se déposent les particules au niveau des plis et donc la réduction de la surface de filtration. Dans ce paragraphe, le dépôt des particules microniques d'alumine à la surface des filtres plissés sera tout d'abord abordé, suivi de celui des particules submicroniques de chlorure de sodium ; dans les deux cas, les observations sont faites à la surface de filtres colmatés en air sec et pour différents taux d'humidité relative.

Les vitesses de filtration mentionnées correspondent aux vitesses initiales mais ne traduisent pas les vitesses réelles d'écoulement au sein des filtres au cours de leur colmatage.

#### III.4.1. Aérosol micronique d'alumine

Le dépôt des particules microniques d'alumine sur les filtres plissés peut tout d'abord être observé en air sec. La figure 3-27 représente des photographies d'une partie de la surface de filtres plissés en fin de colmatage en air sec à une vitesse de filtration de  $2,6 \text{ cm.s}^{-1}$  et pour deux différentes masses surfaciques de particules collectées.

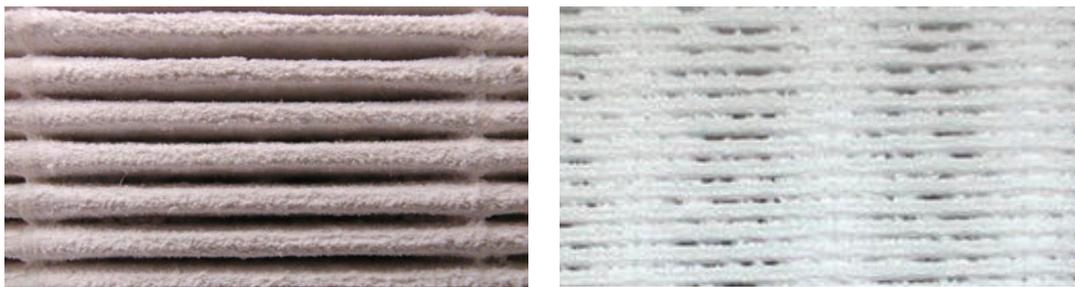


Figure 3-27 : Photographies d'une partie de la surface de deux filtres plissés après un colmatage à  $2,6 \text{ cm.s}^{-1}$ , à 5 % d'humidité relative et à deux masses surfaciques de particules d'alumine déposées différentes : à gauche de  $95 \text{ g.m}^{-2}$  et à droite de  $240 \text{ g.m}^{-2}$

L'observation des photographies permet de mettre en évidence qu'au cours du colmatage une grande partie des particules a tendance à se déposer préférentiellement dans la zone autour des fils servant à l'écartement des plis ; c'est dans cette zone que l'écartement des plis est quelque peu réduit, favorisant ainsi le dépôt des particules.

L'influence de la vitesse de filtration peut également être observée à l'aide de photographies de la surface des filtres. La figure 3-28 représente deux photographies de filtres après leur colmatage en air sec (HR= 5 %) à deux vitesses de filtration différentes de  $1,2$  et  $2,6 \text{ cm.s}^{-1}$ , et pour une masse surfacique de particules déposées d'environ  $240 \text{ g.m}^{-2}$ .

L'observation des photographies montre qu'à une vitesse de filtration de  $1,2 \text{ cm.s}^{-1}$ , de nombreux plis sont fermés à la fin du colmatage, alors qu'à  $2,6 \text{ cm.s}^{-1}$  tous les plis sont encore partiellement ouverts.

Ces observations expliquent pourquoi le rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  est plus important, pour une même masse de particules déposées, lorsque la vitesse de filtration est faible.

Selon Del Fabbro (2001), lorsque la vitesse de filtration augmente les particules microniques se déposent préférentiellement au creux du pli, au détriment des crêtes, ce qui retarde la réduction de la surface de filtration par obturation des plis.



Figure 3–28 : Photographies de la surface de deux filtres plissés après un colmatage jusqu'à  $240 \text{ g.m}^{-2}$  de particules d'alumine, à 5 % d'humidité relative et à deux vitesses de filtration : à gauche de  $1,2 \text{ cm.s}^{-1}$  et à droite de  $2,6 \text{ cm.s}^{-1}$

L'influence de l'humidité sur le dépôt des particules au niveau des plis peut être observée sur la figure 3–29 qui représente deux photographies d'une partie de la surface de filtres plissés en fin de colmatage à une vitesse de filtration de  $2,6 \text{ cm.s}^{-1}$ , pour une masse surfacique de particules déposées d'environ  $100 \text{ g.m}^{-2}$  et pour deux taux d'humidité relative de l'air de 5 et 100 %.

Les résultats indiquent que pour les deux filtres ayant filtré environ la même masse d'aérosol à deux valeurs extrêmes d'humidité relative de 5 et 100 %, le nombre de plis restant ouverts en fin de colmatage est plus important pour le filtre colmaté en air sec, ce qui explique que sa perte de charge soit plus faible. La présence d'humidité accélère donc le processus de fermeture des plis. En effet, les forces d'adhésion entre les particules, et notamment les forces de capillarité, sont accentuées lorsque l'humidité augmente. Ainsi, plus les forces d'adhésion sont importantes, moins l'aérosol a de probabilité de pénétrer loin dans le pli. Il y a donc une accumulation des particules au niveau des crêtes qui entraîne une fermeture des plis. La photographie du filtre colmaté à 100 % d'humidité relative révèle également que lorsque beaucoup de plis sont bouchés, il y a création de passages préférentiels dans lesquels la vitesse d'écoulement est très importante.



Figure 3–29 : Photographies d'une partie de la surface de deux filtres plissés après un colmatage à  $2,6 \text{ cm.s}^{-1}$ , jusqu'à environ  $100 \text{ g.m}^{-2}$  de particules d'alumine et à deux taux d'humidité relative de l'air différents : à gauche de 5 % et à droite 100 %

### III.4.2. Aérosol submicronique de chlorure de sodium

La façon dont les particules submicroniques de chlorure de sodium se déposent au niveau des plis est tout d'abord comparée avec le dépôt des particules microniques d'alumine. La figure 3–30 représente deux photographies d'une partie de la surface de filtres plissés en fin de colmatage à une vitesse de filtration d'environ  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$  en air sec pour l'aérosol de chlorure de sodium et celui d'alumine, jusqu'à des masses surfaciques de particules déposées respectivement de  $70 \text{ g.m}^{-2}$  et de  $95 \text{ g.m}^{-2}$ .



Figure 3–30 : Photographies d'une partie de la surface de deux filtres plissés après un colmatage à  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$  et 5 % d'humidité relative avec deux aérosols différents : à gauche chlorure de sodium jusqu'à  $70 \text{ g.m}^{-2}$  et à droite alumine jusqu'à  $95 \text{ g.m}^{-2}$

Les observations montrent que le dépôt des particules au niveau des plis est différent selon la granulométrie de l'aérosol. Les particules microniques, de par leur inertie, ont tendance à quitter les lignes de courant pour s'impacter de façon non homogène sur la hauteur du pli et plus particulièrement au creux des plis. Pour l'aérosol submicronique, les particules suivent les lignes de courant ; la photographie confirme que le dépôt se fait en particulier au niveau des crêtes. En effet, les photographies montrent que pour une masse de particules déposées du même ordre de grandeur, le dépôt des particules submicroniques sous la forme de dendrites conduit à une diminution de la surface de filtration assez importante, avec fermeture partielle ou totale des plis y compris au niveau des crêtes par création de « ponts » entre celles-ci ; le dépôt de particules microniques semble quant à lui engendrer une plus faible réduction de la surface de filtration, uniquement due à l'épaisseur du gâteau.

Concernant l'influence de la vitesse de filtration, les résultats expérimentaux avec l'aérosol de chlorure de sodium ont montré que, contrairement aux particules microniques, sa modification n'influe pas de façon notable sur le rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  du filtre et donc vraisemblablement sur le dépôt des particules.

Concernant l'influence de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge des filtres plissés colmatés avec l'aérosol de chlorure de sodium, les résultats expérimentaux ont montré trois zones caractéristiques d'influence :

- pour un taux d'humidité relative inférieur à 52 %, la présence d'humidité conduit, pendant la formation du gâteau, à une plus faible perte de charge du filtre pour une même masse de particules collectées (avec apparition d'un point d'inflexion Cf. figure 3–10) ; puis, lorsque la réduction de la surface de filtration devient importante (masse surfacique de particules déposées supérieure à  $80 \text{ g.m}^{-2}$ ), pour une même masse de particules déposées, la perte de charge du filtre devrait être d'autant plus importante que l'humidité de l'air est grande ;

La figure 3–31 représente deux photographies d'une partie de la surface de filtres plissés en fin de colmatage à une vitesse de filtration de  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$  jusqu'à une masse surfacique de particules déposées d'environ  $70 \text{ g.m}^{-2}$  et pour deux taux d'humidité relative de l'air de 5 et 50 %. Pour cette masse surfacique de particules déposées, les résultats présentés sur la figure 3–10 montrent que l'influence de l'humidité est peu marquée, ce que confirme l'observation des filtres qui ne permet pas de distinguer une influence de l'humidité sur le dépôt des particules.



Figure 3–31 : Photographies d'une partie de la surface de deux filtres plissés après un colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium effectué à  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$  jusqu'à environ  $70 \text{ g.m}^{-2}$  et pour deux taux d'humidité relative différents : à gauche 5 % et à droite 50 %

- pour un taux d'humidité relative de l'air autour de 60 - 70 %, la présence d'humidité conduit à un colmatage du filtre beaucoup plus rapide, i. e. à une perte de charge plus importante pour une même masse de particules déposées ;

La figure 3–32 représente les photographies d'un filtre plissé en fin de colmatage à une vitesse de filtration de  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$  jusqu'à une masse surfacique de particules déposées d'environ  $57 \text{ g.m}^{-2}$  et à un taux d'humidité relative de l'air de 70 %. L'observation des photographies met clairement en évidence que certains plis sont littéralement collés les uns aux autres. Entre 60 et 70 % d'humidité relative, l'aérosol se trouve dans un état intermédiaire entre une forme solide et une forme liquide puisque selon Foster et Ewing (1999) (Cf. § IV.3.2 c du chapitre 1), un mince film liquide est adsorbé à la surface des particules de chlorure de sodium ; la figure 3–20 confirme l'adsorption de la vapeur d'eau par les particules déposées sur le filtre dans cette zone d'humidité. Cet état intermédiaire conduit vraisemblablement à ce phénomène de collage de certains plis, principalement au niveau des crêtes, phénomène responsable de l'importante perte de charge du filtre.

Il convient de signaler que les essais à 60 % d'humidité relative ont été reproduits 3 fois et que le même effet est chaque fois observé.



Figure 3–32 : Photographies de la surface (à gauche) et d'une partie de cette surface (à droite) d'un filtre plissé après un colmatage avec un aérosol de chlorure de sodium à  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$  jusqu'à environ  $57 \text{ g.m}^{-2}$  et à un taux d'humidité relative de 70 %

- pour un taux d'humidité relative supérieur ou égal à 75 %, l'allure des courbes d'évolution de la perte de charge des filtres tend vers celle d'un colmatage avec un aérosol liquide.

La figure 3–33, qui représente une photographie d'une partie de la surface d'un filtre plissé en fin de colmatage à une vitesse de filtration de  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$  et un taux d'humidité relative de 79 %, confirme que pour un taux d'humidité relative supérieur au point de déliquescence des particules de chlorure de sodium il n'y a pas de formation de gâteau à la surface du filtre, mais donc bien une filtration de gouttelettes.



Figure 3–33 : Photographie d'une partie de la surface d'un filtre plissé après un colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium effectué à  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$  jusqu'à environ  $110 \text{ g.m}^{-2}$  et à un taux d'humidité relative de 79 % (supérieur au point de déliquescence des particules)

### Bilan

*Cette partie a permis de caractériser le dépôt des particules sous humidité.*

*L'observation des clichés au MEB de la surface des filtres plans, en particulier ceux colmatés avec l'aérosol de chlorure de sodium, a mis en évidence une agglomération des particules entre elles lorsque le gâteau est formé en présence d'humidité, agglomération causée par l'augmentation des forces d'adhésion (forces de capillarité) entre les particules ; la surface spécifique des particules constituant le dépôt est donc plus faible et conduit donc à une plus faible résistance à l'écoulement observée expérimentalement.*

*Des mesures de l'épaisseur des gâteaux de particules n'ont pas mis en évidence d'influence sensible de l'humidité sur la compacité des gâteaux.*

*La relation de Novick (1992) a été utilisée pour calculer la résistance spécifique des gâteaux de particules. Les résultats ont révélé que la baisse de la résistance spécifique des gâteaux de particules observée expérimentalement sur les filtres plans pour les deux aérosols testés lorsque l'humidité relative de l'air augmente ne peut pas être expliquée par les variations de granulométrie de l'aérosol et de la viscosité dynamique de l'air ; il y a donc une influence de l'humidité sur la façon dont se déposent les particules.*

*Enfin, concernant le dépôt des particules au niveau des plis, l'observation de la surface frontale des filtres plissés après leur colmatage a mis en évidence, pour les deux types d'aérosol hygroscopique et non-hygroscopique, une fermeture des plis plus rapide lorsque l'air est humide.*

*Les résultats expérimentaux d'évolution du coefficient d'épuration d'un filtre THE colmaté sous humidité par l'aérosol d'alumine ou de chlorure de sodium sont présentés dans la prochaine partie.*

## IV. EVOLUTION DU COEFFICIENT D'EPURATION DES FILTRES PLISSES COLMATES SOUS HUMIDITE

Cette partie est consacrée à l'étude de l'évolution du coefficient d'épuration des filtres plissés colmatés avec l'aérosol d'alumine ou de chlorure de sodium à différents taux d'humidité relative. Les mesures du coefficient d'épuration des filtres colmatés sont réalisées, comme pour les filtres vierges, avec l'aérosol normalisé d'uranine.

### IV.1. Colmatages avec l'aérosol d'alumine

Le coefficient d'épuration des filtres plissés colmatés avec l'aérosol non-hygroscopique d'alumine a été mesuré à la vitesse nominale de filtration, à différents degrés de colmatage, i. e. pour différentes masses surfaciques de particules déposées, et à différents taux d'humidité relative compris entre 5 et 100 %.

La figure 3–34 représente l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé colmaté à vitesse nominale de filtration, ainsi que l'évolution du rapport  $\frac{CE_h}{CE_{vierge\ sec}}$  entre le coefficient d'épuration du

filtre en air humide et celui du filtre vierge mesuré en air sec, cela pour trois taux d'humidité relative de 5, 95 et 100 %.

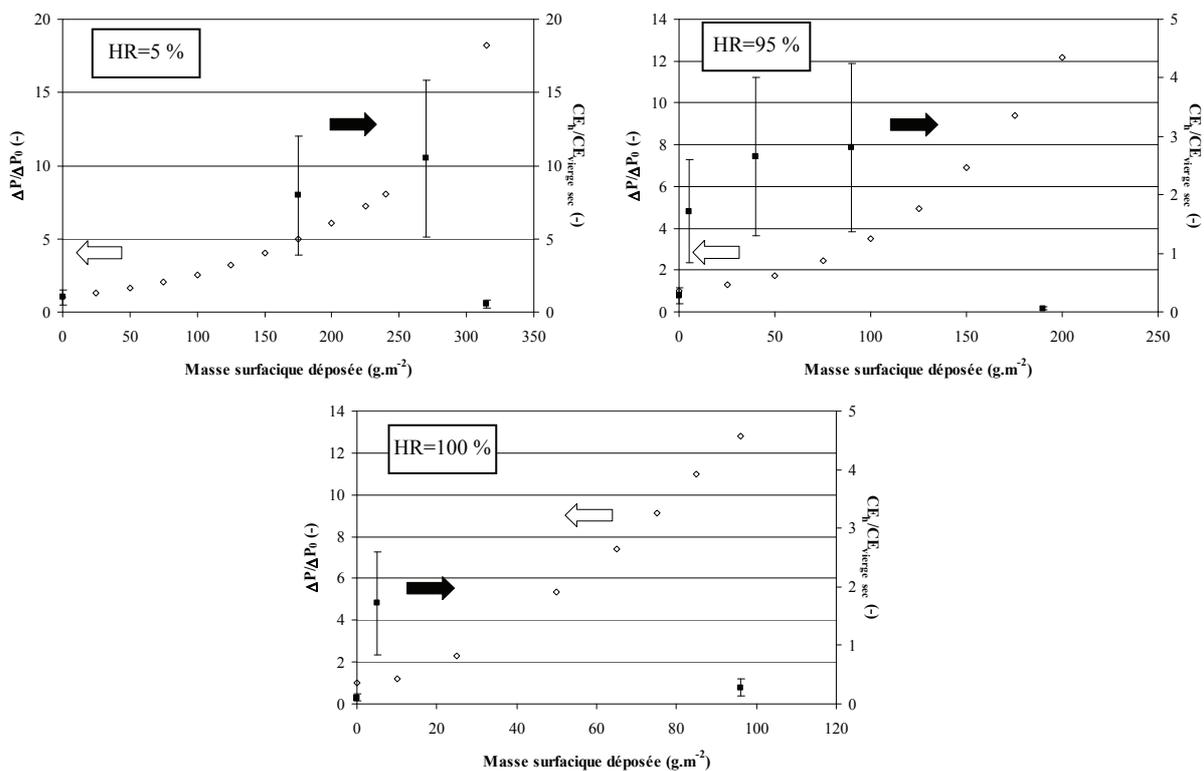


Figure 3–34 : Evolutions comparatives du coefficient d'épuration et de la perte de charge d'un filtre plissé durant son colmatage avec un aérosol non-hygroscopique d'alumine pour différents taux d'humidité relative

Les résultats montrent que, quel que soit le taux d'humidité relative du colmatage, le coefficient d'épuration du filtre passe par un maximum en fonction de la masse surfacique de particules déposées. Dans un premier temps, il augmente durant la formation du gâteau de particules ; en effet, les particules formant le gâteau constituent des collecteurs supplémentaires qui concourent, comme les fibres, à la collecte des particules d'uranine. Le rapport des coefficients d'épuration atteint une valeur maximale de 10 à 5 % d'humidité relative et de 3 pour un colmatage à 95 % d'humidité relative (le peu de valeurs expérimentales à une humidité relative de 100 % ne permet pas de conclure).

Ainsi, le gâteau formé à une humidité relative de 5 % conduit à une efficacité de collecte des particules d'uranine plus importante que celui formé à une humidité relative de 95 %. Le maximum intervenant pour une masse de particules déposées plus importante à 5 % d'humidité relative ( $270 \text{ g.m}^{-2}$ ) qu'à 95 % ( $100 \text{ g.m}^{-2}$ ), cela peut s'expliquer vraisemblablement plus par les caractéristiques du dépôt des particules (épaisseur plus importante), que par le caractère hygroscopique de l'uranine.

Lorsque le colmatage du filtre devient important, i. e. au-delà d'un rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  compris entre 8 et 10,

les résultats indiquent que quelle que soit l'humidité relative, le coefficient d'épuration diminue. Cette baisse apparaît pour une masse surfacique de particules collectées d'autant plus faible que le colmatage du filtre est rapide donc que le taux d'humidité de l'air est grand.

Cette baisse peut être attribuée à la réduction de la surface de filtration conduisant à une augmentation de la vitesse interstitielle de filtration. En effet, ce sont les mécanismes de capture par diffusion et interception qui sont prépondérants dans la collecte de l'aérosol d'uranine et l'efficacité globale de collecte diminue lorsque la vitesse de filtration augmente. Les photographies de filtres plissés en fin de colmatage ont mis en évidence la présence de passages préférentiels lorsque le colmatage des filtres est très avancé et que la plupart des plis sont totalement bouchés ; la vitesse de filtration dans ces passages préférentiels est donc très importante. La figure 3-35 représente une photographie d'un filtre plissé colmaté avec l'aérosol d'alumine à 95 % d'humidité relative jusqu'à un rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0} = 11$  ; elle met en évidence que la surface de filtration a été considérablement réduite durant le colmatage.

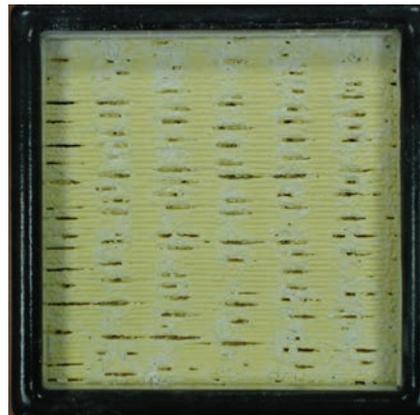


Figure 3-35 : Photographie de la surface frontale d'un filtre plissé après son colmatage à 95 % d'humidité relative et à  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$  par l'aérosol d'alumine

Il est intéressant de remarquer que l'influence de l'humidité sur le filtre vierge peut également être observée sur cette représentation ; en effet, le rapport des coefficients d'épuration est inférieur à 1 pour les taux d'humidité relative de 95 et 100 % lorsque la masse surfacique de particules déposées est nulle.

#### IV.2. Colmatages avec l'aérosol de chlorure de sodium

Le coefficient d'épuration de filtres plissés colmatés avec l'aérosol hygroscopique de chlorure de sodium a été mesuré à la vitesse nominale de filtration, à différents degrés de colmatage, i. e. pour différentes masses de particules déposées, et à différents taux d'humidité relative compris entre 5 et 80 %.

La figure 3-36 représente l'évolution de la perte de charge du filtre plissé colmaté à vitesse nominale de filtration, ainsi que l'évolution du rapport  $\frac{CE_h}{CE_{\text{viergesec}}}$  entre le coefficient d'épuration du filtre en air

humide et celui du filtre vierge mesuré en air sec, cela pour trois taux d'humidité relative testés de 5, 60 et 80 %.

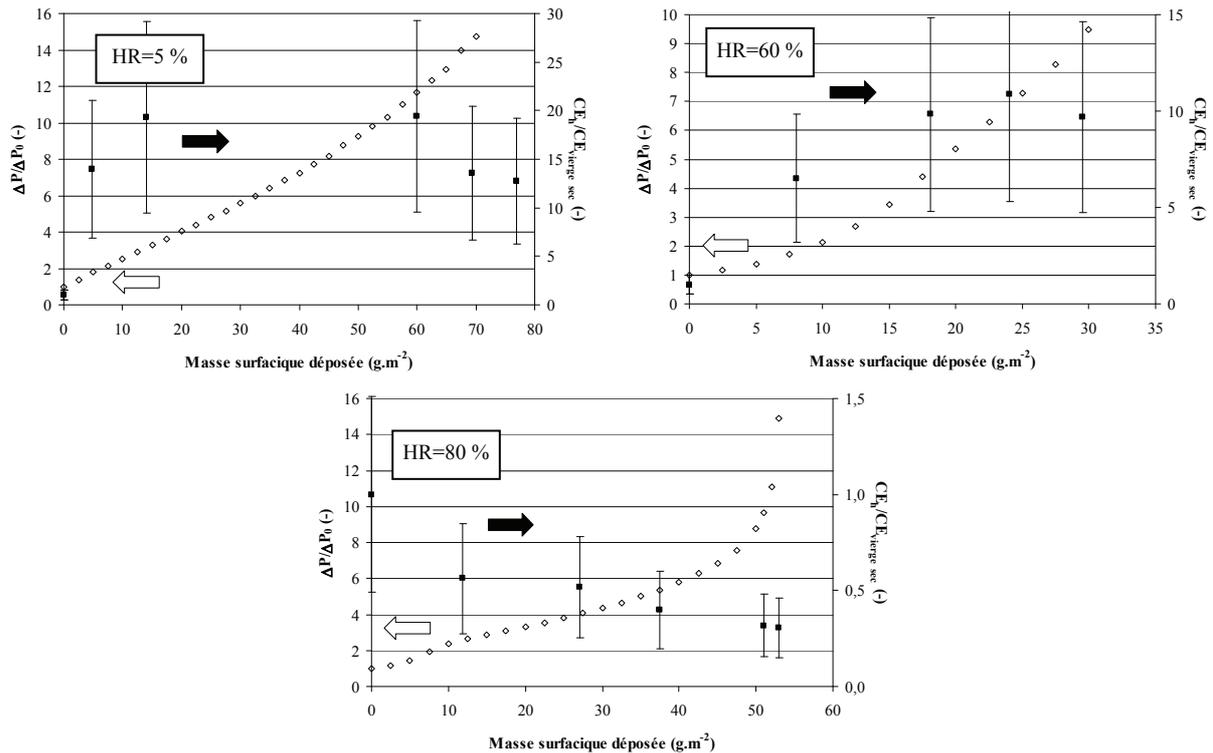


Figure 3–36 : Evolutions comparatives du coefficient d'épuration et de la perte de charge d'un filtre plissé durant son colmatage avec l'aérosol hygroscopique de chlorure de sodium pour différents taux d'humidité relative

Les résultats montrent que, pour les colmatages effectués à 5 et 60 % d'humidité relative, donc en dessous du point de déliquescence de l'aérosol de chlorure de sodium, le coefficient d'épuration, comme pour l'aérosol d'alumine, passe par un maximum en fonction de la masse surfacique de particules collectées. Le coefficient d'épuration augmente pendant le début du colmatage, correspondant à la phase de colmatage en surface. L'augmentation du rapport des coefficients d'épuration atteint une valeur de 20 à 5 % d'humidité relative et seulement 10 pour un colmatage à 60 % d'humidité relative. Ainsi, le gâteau de particules formé à 5 % d'humidité relative a une résistance spécifique plus faible que celui formé à 60 % d'humidité relative et il a en plus une plus grande efficacité de collecte des particules d'uranine. Comme pour l'aérosol d'alumine, ceci peut s'expliquer par une évolution des caractéristiques du dépôt en présence d'humidité relative, préférentiellement à l'hygroscopicité de l'uranine dans cette gamme d'humidité.

Puis, au-delà d'une masse surfacique de 20  $\text{g.m}^{-2}$ , le coefficient d'épuration pour les colmatages effectués à 5 et 60 % d'humidité relative se stabilise. Les incertitudes associées aux valeurs de coefficient d'épuration étant très importantes, il est difficile de dégager une tendance pour les masses surfaciques déposées plus importantes ; néanmoins, il semble que le colmatage effectué à 5 % d'humidité relative révèle qu'au-delà d'une masse surfacique déposée de 60  $\text{g.m}^{-2}$  le coefficient d'épuration diminue mais de manière moins importante qu'avec l'aérosol d'alumine. Cette observation viendrait confirmer les résultats obtenus avec l'aérosol d'alumine et qui peuvent être associés à une augmentation de la vitesse interstitielle due à la réduction de la surface de filtration. Comme le colmatage en air sec des filtres avec le chlorure de sodium conduit à une réduction de la surface de filtration moins importante qu'avec l'aérosol d'alumine (d'après l'allure de la courbe du chlorure de sodium qui reste presque linéaire), cela signifie qu'en fin de colmatage la vitesse d'écoulement dans le filtre colmaté avec du chlorure de sodium est plus faible et donc que le coefficient d'épuration est plus important.

Pour les colmatages effectués à 80 % d'humidité relative, l'aérosol de chlorure de sodium est sous forme liquide. Les résultats indiquent que le rapport  $\frac{CE_h}{CE_{\text{vierge sec}}}$  diminue au cours du colmatage

conformément aux résultats issus de la littérature sur le colmatage de filtres plans avec un aérosol liquide. Selon Payet (1991) par exemple, les gouttelettes de chlorure de sodium se déposent à la surface des fibres conduisant à la formation de ponts liquides ; cela a pour effet de réduire la quantité de fibres disponibles pour la collecte des particules d'uranine et donc de diminuer l'efficacité de collecte du filtre.

### IV.3. Comparaison des aérosols

La figure 3–37 rassemble l'ensemble des valeurs absolues de coefficients d'épuration des filtres plissés durant leur colmatage à différents taux d'humidité relative avec les aérosols d'alumine et de chlorure de sodium.

Plusieurs observations peuvent être faites :

- la nature de l'aérosol de colmatage, alumine ou chlorure de sodium tant qu'il est solide, n'influe pas sur la valeur du coefficient d'épuration mesuré avec l'aérosol d'uranine ;
- excepté pour le chlorure de sodium au-dessus de son point de déliquescence, le coefficient d'épuration passe par un maximum en fonction de la masse surfacique de particules déposées ; il augmente en début de colmatage, pendant la formation du gâteau de particules, quelle que soit l'humidité relative et quel que soit l'aérosol ; puis le coefficient d'épuration diminue au cours du colmatage quelle que soit l'humidité relative à cause de l'augmentation de la vitesse interstitielle de filtration ;
- le coefficient d'épuration est plus faible lorsque l'aérosol d'uranine est en présence de liquide : eau condensée (alumine à HR = 100 %) ou chlorure de sodium liquide (HR = 80 %) ;
- tous les coefficients d'épuration sont supérieurs à 2000, valeur limite souvent retenue par les exploitants dans les installations nucléaires.

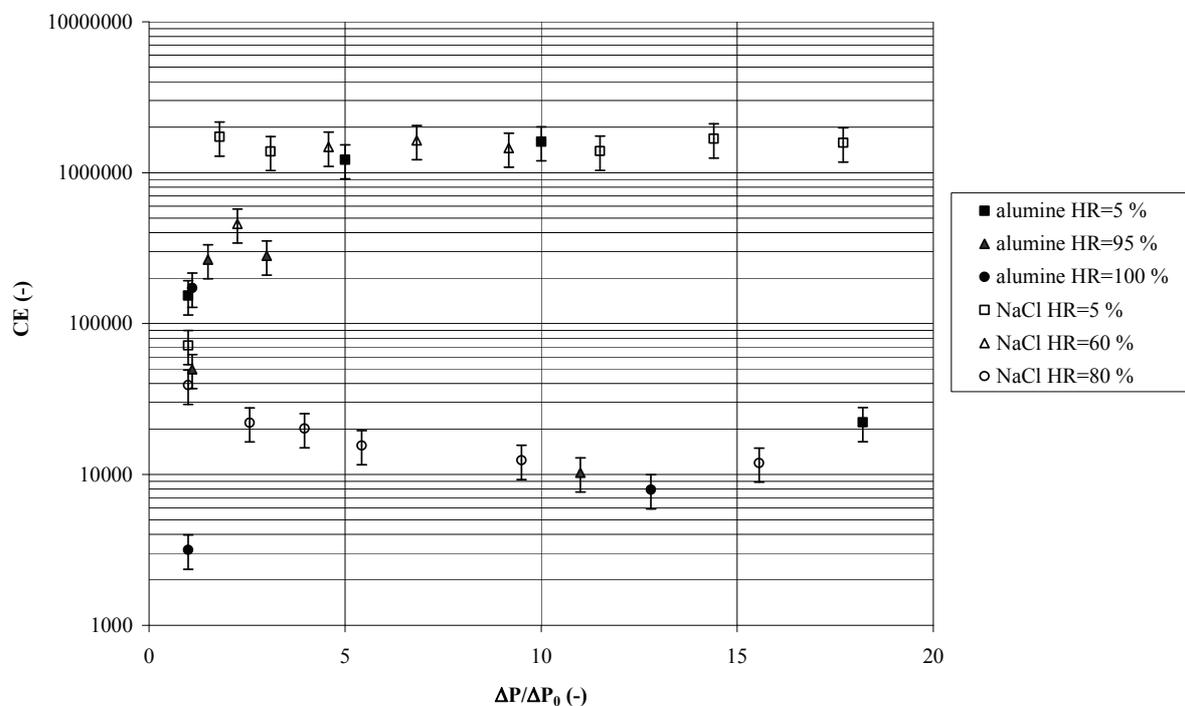


Figure 3–37 : Synthèse des évolutions des coefficients d'épuration des filtres plissés colmatés à différents taux d'humidité relative et différents degrés de colmatage par les aérosols d'alumine et de chlorure de sodium

### Bilan

*Les résultats expérimentaux d'évolution du coefficient d'épuration des filtres plissés colmatés sous humidité ont permis de confirmer l'influence du caractère hygroscopique de l'aérosol. En effet, avec l'aérosol d'alumine ou avec l'aérosol de chlorure de sodium en dessous de son point de déliquescence, le coefficient d'épuration des filtres augmente durant la formation du gâteau de particules puis diminue lorsque la surface de filtration des filtres décroît ; avec l'aérosol de chlorure de sodium au-dessus de son point de déliquescence, le coefficient d'épuration des filtres diminue tout au long du colmatage conformément aux résultats expérimentaux de colmatage de media plans avec un aérosol liquide (Payet, 1991).*

*Dans la prochaine partie, l'influence de la présence d'humidité sur la perte de charge d'un filtre déjà colmaté en air sec ou en air humide est mise en évidence.*

## **V. INFLUENCE DE LA PRESENCE D'HUMIDITE SUR LA PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE APRES SON COLMATAGE**

L'objectif de ce paragraphe est d'étudier l'influence de la présence d'humidité sur un gâteau formé de particules d'alumine ou de chlorure de sodium. Ainsi, les essais sont réalisés soit avec des filtres plans, soit avec des filtres plissés mais pour une masse de particules déposées entraînant une réduction de la surface de filtration négligeable.

Les essais consistent à maintenir le débit d'air (correspondant à la vitesse nominale de filtration d'environ  $2,6 \text{ cm.s}^{-1}$ ) à travers le filtre après son colmatage en étudiant deux différents cas de figure : le maintien du même taux d'humidité relative que pendant le colmatage ou un changement d'humidité relative de l'air. Durant tous les essais, le débit d'air à travers le filtre est maintenu constant. Il convient de préciser que seule l'évolution de la perte de charge du filtre est étudiée durant l'exposition au débit d'air humide puisque la masse d'eau retenue par le filtre en fonction de la masse d'aérosol déposé ne peut pas être connue.

### **V.1. Maintien du taux d'humidité relative de l'air après le colmatage**

La figure 3-38 présente les évolutions du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  de deux filtres plissés pendant et après

leur colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à 5 et 46 % d'humidité relative. La masse surfacique de particules déposées avant l'arrêt de la génération est d'environ  $15 \text{ g.m}^{-2}$ .

Les résultats indiquent que pour un colmatage à 5 % d'humidité relative, le maintien du débit d'air après le colmatage à la même humidité ne modifie pas la valeur du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  obtenue en fin

de colmatage ; pour un colmatage à 46 % d'humidité relative, le maintien du même taux d'humidité après le colmatage provoque une diminution progressive du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  qui passe de 150 à

$100 \text{ Pa.s.cm}^{-1}$  en un peu plus de 15 h d'exposition.

Cette baisse peut être expliquée par une adsorption de la vapeur d'eau à la surface des particules formant le gâteau qui conduirait à une augmentation du diamètre des particules déposées et donc à une diminution de leur surface spécifique ; un réarrangement progressif des particules avec création d'agglomérats est également envisageable. Dans les deux cas, c'est donc la diminution de la surface spécifique des particules qui entraîne une diminution de la perte de charge du gâteau de particules.

Ces résultats mettent ainsi en évidence que le gâteau de particules formé à 46 % d'humidité relative n'est pas en équilibre thermodynamique avec son environnement.

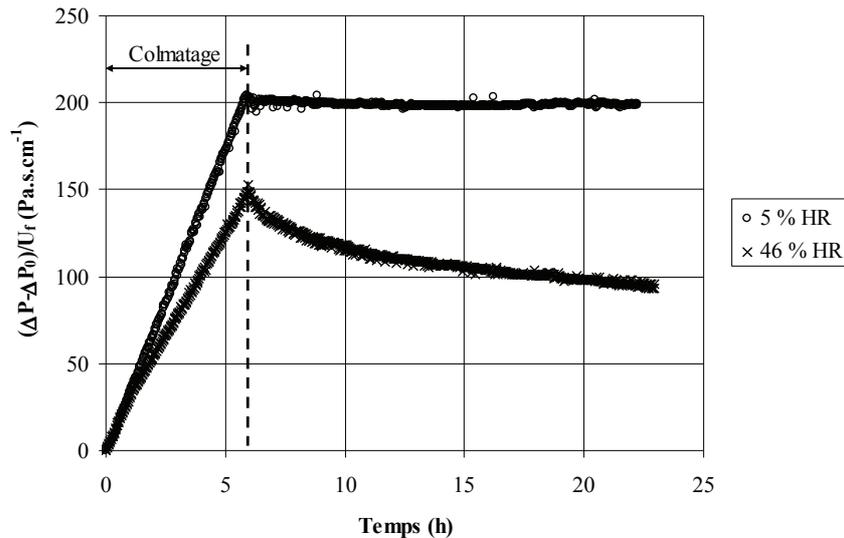


Figure 3–38 : Evolution de la perte de charge de deux filtres plissés pendant et après leur colmatage jusqu'à  $15 \text{ g.m}^{-2}$  avec l'aérosol de chlorure de sodium à deux taux d'humidité relative différents de 5 et 46 %

Le même type d'essai a été effectué avec l'aérosol d'alumine, mais pour une valeur plus élevée de l'humidité relative : un filtre plissé a été colmaté à 100 % d'humidité relative, puis une fois la génération d'aérosol stoppée, le débit d'air est maintenu à travers le filtre au même taux d'humidité.

Les résultats, présentés sur la figure 3–39, indiquent que durant le colmatage le rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  du

filtre augmente jusqu'à environ  $1300 \text{ Pa.s.cm}^{-1}$  ; puis, une fois le colmatage terminé, le rapport diminue en quelques minutes jusqu'à environ  $1100 \text{ Pa.s.cm}^{-1}$  et reste ensuite constant au cours du temps. Comme pour l'aérosol de chlorure de sodium, cette baisse peut être expliquée par une diminution de la surface spécifique des particules. Il est important de noter que, pour cet essai, le colmatage du filtre plissé est relativement important et conduit donc à une réduction non négligeable de sa surface de filtration ; la masse surfacique de particules déposées est de  $96 \text{ g.m}^{-2}$ .

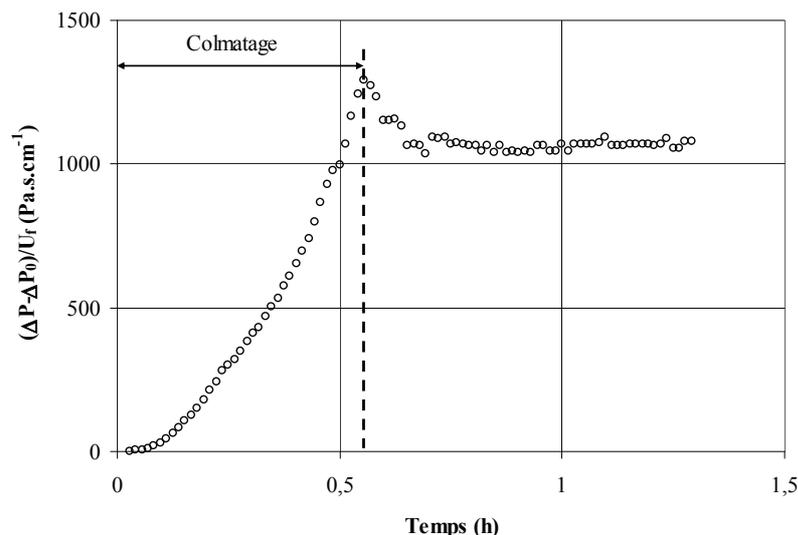


Figure 3–39 : Evolution de la perte de charge d'un filtre plissé pendant et après son colmatage jusqu'à  $96 \text{ g.m}^{-2}$  avec l'aérosol d'alumine à 100 % d'humidité relative

## V.2. Changement d'humidité relative après le colmatage

Les résultats qui vont suivre doivent être pris comme des constats d'observation. L'intérêt de tels essais est de répondre à des questionnements relatifs à des scénarios, avec un changement d'humidité brutale, afin de connaître de façon générale le comportement de la perte de charge d'un filtre colmaté et soumis à un débit d'air humide.

### V.2.1. Augmentation de l'humidité relative de l'air

Un filtre plan a été colmaté avec l'aérosol de chlorure de sodium en air sec (HR = 5 %) puis, une fois le colmatage stoppé ( $10 \text{ g.m}^{-2}$ ), l'air traversant le filtre a subi un pic d'humidité relative à une valeur de 55 % puis l'humidité relative de l'air a été maintenue à 30 % ; les résultats d'évolution du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  du filtre durant tout l'essai sont reportés sur la figure 3-40.

Les résultats montrent qu'après le colmatage, l'augmentation de l'humidité relative de l'air de 5 à 55 % conduit à une diminution subite d'environ 50 % de la perte de charge du filtre suivie d'une stabilisation qui témoigne vraisemblablement d'un équilibre thermodynamique atteint. Cette baisse aussi instantanée peut être là encore attribuée à un réarrangement du gâteau de particules qui pourrait être initié par une adsorption de vapeur par les particules de chlorure de sodium.

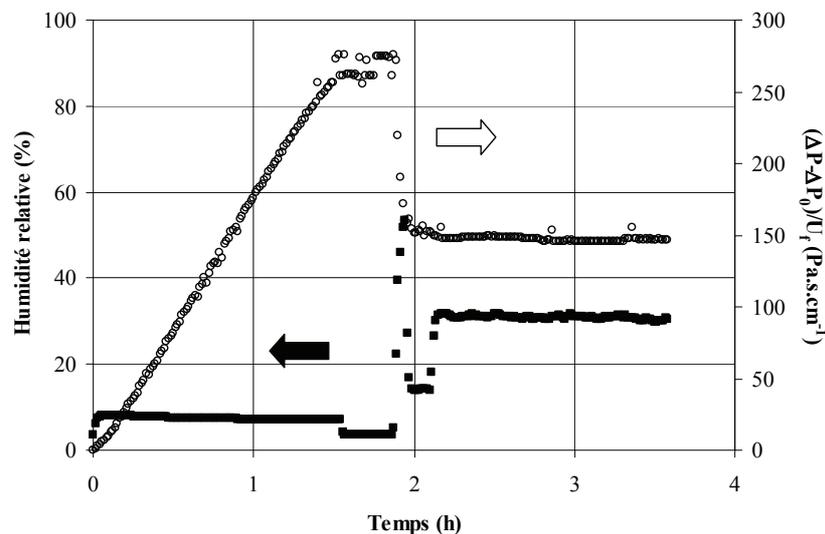


Figure 3-40 : Evolutions de l'humidité relative de l'air et de la perte de charge d'un filtre plan pendant son colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à 5 % d'HR, puis après un pic à 55 % d'HR

Un essai similaire, illustré sur la figure 3-41, a montré que pour un taux d'humidité de l'air après le colmatage supérieur au point de déliquescence des particules de chlorure de sodium (> 75 % d'humidité relative), la perte de charge du filtre (colmaté jusqu'à  $14 \text{ g.m}^{-2}$ ) diminue de près de 80 % de manière brutale lorsque les particules passent sous forme liquide.

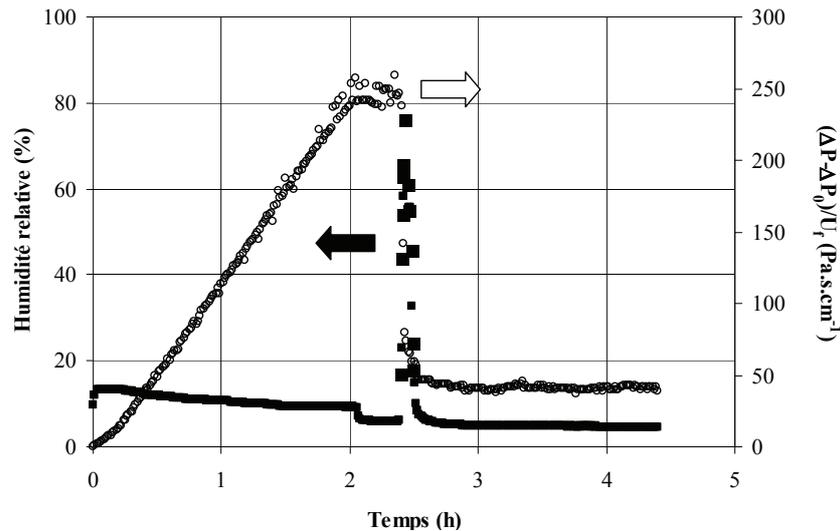


Figure 3–41 : Evolutions de l'humidité relative de l'air et de la perte de charge d'un filtre plan pendant son colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à 5 % d'HR, puis après un pic à 75 % d'HR

Le même type d'essai a été réalisé avec l'aérosol non-hygroscopique d'alumine : un filtre plan a été colmaté à un taux d'humidité relative de 5 %, puis une fois le colmatage stoppé (5 g.m<sup>-2</sup>), l'humidité relative de l'air parcourant le filtre est élevée jusqu'à environ 95 % ; la figure 3–42 présente l'évolution du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  du filtre durant l'essai.

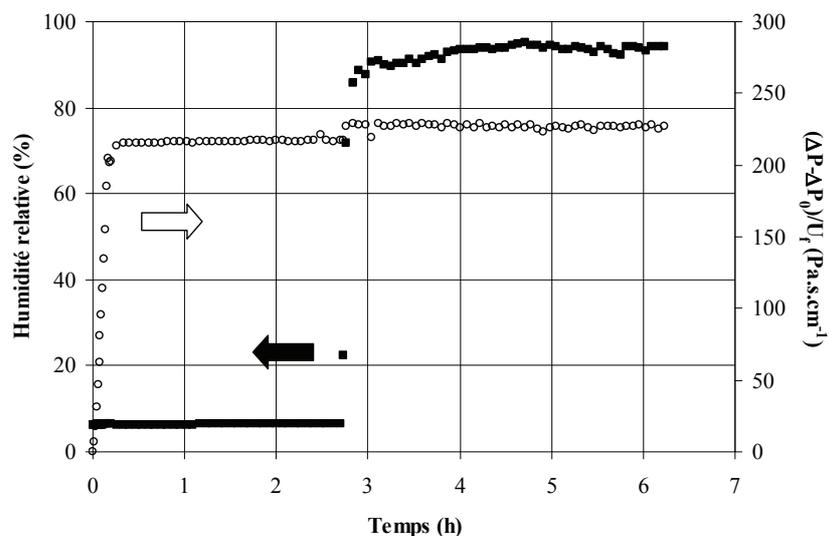


Figure 3–42 : Evolutions de l'humidité relative de l'air et de la perte de charge d'un filtre plan pendant son colmatage avec l'aérosol d'alumine à 5 % d'HR, puis après le maintien du débit d'air à 95 % d'HR

Les résultats montrent qu'après le colmatage du filtre, l'augmentation du taux d'humidité relative de l'air de 5 % à 95 % provoque une légère et très rapide augmentation du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  du filtre suivie d'une stabilisation. Cette augmentation ne peut pas être liée aux modifications des paramètres physiques de l'air. En effet, à une température de 25 °C, la masse volumique et la viscosité dynamique de l'air diminuent légèrement lorsque l'air passe de 5 à 95 % (Tsilingiris, 2008) ; ainsi, la prise en compte de la viscosité dynamique de l'air en fonction de l'humidité viendrait encore accentuer l'écart observé. L'augmentation du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  est donc vraisemblablement liée à une restructuration du gâteau de particules qui d'après les résultats semble être très rapide.

### V.2.2. Diminution de l'humidité relative de l'air

La figure 3-43 présente l'évolution du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  d'un filtre plissé pendant son colmatage à 50 % d'humidité relative avec l'aérosol de chlorure de sodium puis, après son colmatage (15 g.m<sup>-2</sup>), à une exposition à un débit d'air à 5 % d'humidité relative.

Les résultats révèlent qu'après le colmatage, le passage d'un taux d'humidité relative de 50 à 5 % conduit à une légère diminution du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  du filtre qui passe de 160 à 150 Pa.s.cm<sup>-1</sup> assez

rapidement puis se stabilise. Cette très faible diminution (inférieure à 10 %) peut être attribuée soit à une légère restructuration du gâteau, soit à une modification des caractéristiques physiques de l'air. Néanmoins, comme cela a déjà été indiqué, Tsilingiris (2008) montre qu'à 25 °C les paramètres physiques de l'air évoluent peu ; en effet, la diminution entre la viscosité dynamique de l'air à 25 °C et 5 % d'humidité relative et à 50 % n'est que d'environ 1 %, soit bien trop faible pour expliquer cette baisse. C'est donc la restructuration du gâteau qui semble encore une fois être l'hypothèse la plus plausible.

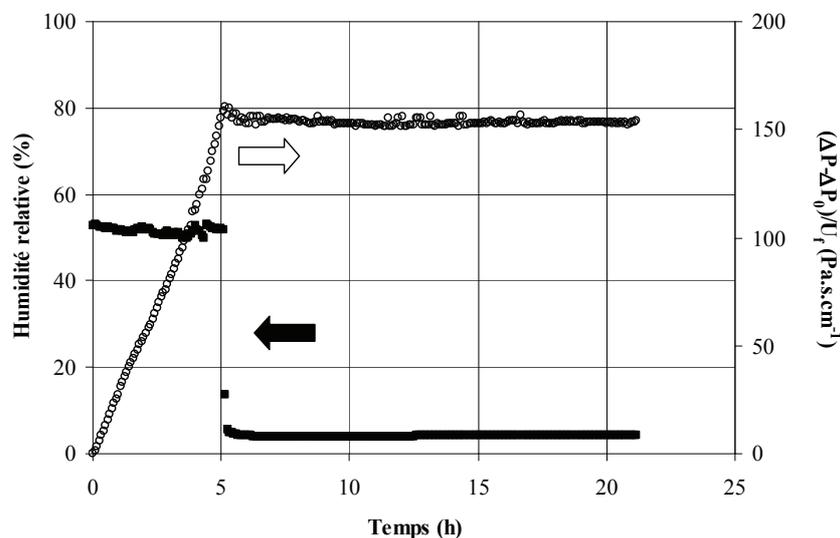


Figure 3-43 : Evolutions de l'humidité relative de l'air et de la perte de charge d'un filtre plissé pendant son colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à 50 % d'HR, puis après maintien d'un débit d'air à 5 % d'HR

Le même type d'essai a été réalisé avec l'aérosol d'alumine : un filtre plissé a été colmaté à 100 % d'humidité relative, puis après l'arrêt du colmatage (96 g.m<sup>-2</sup>), l'humidité est maintenue à 100 % pendant presque 1 h conduisant à une diminution du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  présentée précédemment sur la figure 3-39, et enfin l'humidité relative de l'air est abaissée à 15 % ; les résultats sont représentés sur la figure 3-44.

Les résultats indiquent qu'après le colmatage du filtre, le passage en air sec conduit à une baisse significative d'environ 75 % du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$ .

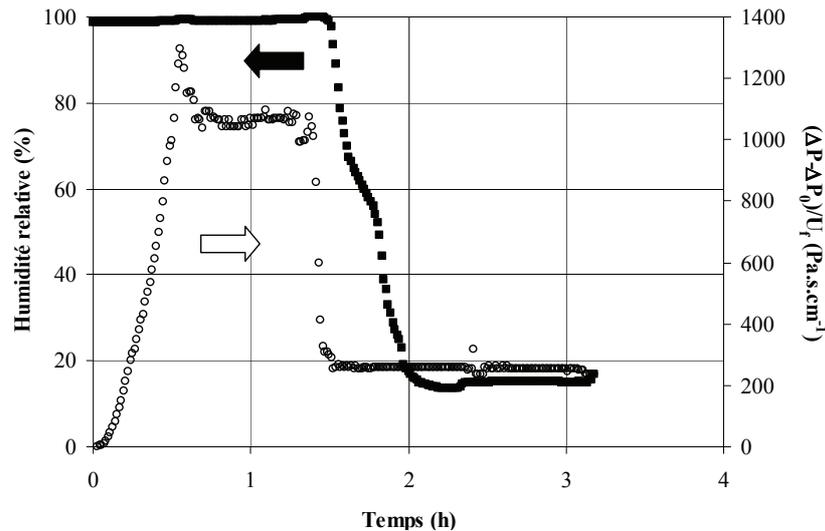


Figure 3–44 : Evolutions de l'humidité relative de l'air et de la perte de charge d'un filtre plissé pendant son colmatage avec l'aérosol d'alumine à 100 % d'HR, puis après maintien d'un débit d'air à 15 % d'HR

### Bilan

Le fait marquant révélé dans cette partie est que le gâteau de particules formé en air humide peut, notamment dans le cas des particules de chlorure de sodium, ne pas être en équilibre thermodynamique avec l'environnement. Ceci met en évidence la nécessité de prendre en compte l'adsorption de la vapeur d'eau par le gâteau de particules pour la modélisation de l'évolution de la perte de charge d'un filtre colmaté sous humidité.

Les résultats issus des différents essais de modification de l'humidité relative de l'air après le colmatage d'un filtre témoignent de la complexité de travailler avec de l'air humide. En effet, l'évolution de la perte de charge des filtres est très variée en fonction de l'aérosol étudié. Les différents résultats, qui n'ont pu être expliqués de manière certaine, sont donc à considérer comme des constats d'observation.

## VI. CONCLUSION

L'ensemble des résultats expérimentaux propres à l'influence de l'humidité en filtration THE a été présenté dans ce chapitre. Les performances initiales des filtres sous humidité ont été examinées. Les résultats ont révélé une diminution du coefficient d'épuration des filtres, mesuré à l'aérosol normalisé d'uranine, au-delà de 90 % d'humidité relative, mais aucune influence de l'humidité sur leur perte de charge initiale.

Les résultats expérimentaux ont confirmé l'influence du caractère hygroscopique de l'aérosol sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre colmaté sous humidité et ont également mis en évidence l'influence de la géométrie plane ou plissée du filtre.

De façon générale, la filtration sous humidité d'un aérosol non-hygroscopique ou d'un aérosol hygroscopique en dessous de son point de déliquescence conduit, pour un filtre plan à une baisse de la résistance spécifique du gâteau de particules, pour un filtre plissé à une fermeture plus rapide des plis et donc à partir d'une certaine masse surfacique de particules collectées à une plus grande perte de charge ; avec un aérosol hygroscopique au-dessus de son point de déliquescence, l'évolution de la perte de charge d'un filtre plan ou plissé est caractéristique d'un colmatage avec un aérosol liquide. Les résultats ont aussi montré que l'influence de la vitesse de filtration sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre est différente selon sa géométrie et la granulométrie de l'aérosol.

L'évolution de l'efficacité des filtres sous humidité a également confirmé l'influence de la nature hygroscopique de l'aérosol. En effet, le coefficient d'épuration des filtres plissés étudiés passe par un maximum en fonction de la masse surfacique de particules déposées, quelle que soit l'humidité relative, pour l'aérosol non-hygroscopique ou pour l'aérosol hygroscopique en dessous de son point de

déliquescence ; pour l'aérosol hygroscopique au-dessus de son point de déliquescence, le coefficient d'épuration diminue en fonction de la masse surfacique de particules déposées. Les différents résultats obtenus sur les filtres plissés durant ces travaux sont regroupés dans le tableau 3–5.

Afin d'expliquer ces résultats, une caractérisation du dépôt des particules a été effectuée par différentes méthodes. Des clichés au microscope électronique à balayage de la surface des filtres plans, en particulier ceux colmatés avec l'aérosol de chlorure de sodium, ont mis en évidence une agglomération des particules entre elles lorsque le gâteau est formé en présence d'humidité. Cette agglomération des particules, causée par l'augmentation des forces d'adhésion (forces de capillarité) entre les particules lorsque l'humidité de l'air augmente, conduit à une plus faible surface spécifique des particules déposées et donc à une plus faible résistance à l'écoulement du gâteau. Par ailleurs, en ce qui concerne le dépôt des particules au niveau des filtres plissés, l'observation de leur surface frontale en fin de colmatage a témoigné d'une fermeture des plis plus importante lorsque l'humidité relative de l'air augmente.

Enfin, des essais ont mis en évidence le fait que les gâteaux de particules formés sous humidité peuvent ne pas être à l'équilibre avec le milieu environnant, révélant ainsi l'importance de l'adsorption de la vapeur d'eau par les aérosols. L'adsorption de la vapeur d'eau contenue dans l'air a d'ailleurs été confirmée par l'étude des masses d'eau transférées durant les colmatages. Les résultats ont montré que l'adsorption apparaît à partir de 80 % d'humidité relative pour les particules d'alumine et dès 20 % pour les particules de chlorure de sodium, puis augmente avec l'humidité relative.

C'est à partir de l'ensemble de ces résultats et notamment de la dernière partie, que le prochain et dernier chapitre s'est appuyé. En effet, la suite de ces travaux propose une méthode d'estimation de la perte de charge d'un filtre colmaté sous humidité avec un aérosol solide.

Tableau 3–5 : Influence de la nature hygroscopique de l'aérosol sur l'évolution de la perte de charge ( $\Delta P$ ), sur l'influence de la vitesse de filtration ( $U_f$ ) et sur le coefficient d'épuration ( $CE$ ) d'un filtre THE à petit plis durant son colmatage sous humidité

	Aérosol hygroscopique submicronique		Aérosol non-hygroscopique micronique
	HR < HRD	HR > HRD	
Perte de charge	<u>Colmatage en surface :</u> $\Delta P \searrow$ quand HR $\nearrow$ pour une même masse de particules collectées <u>Etape de réduction de la surface de filtration :</u> $\Delta P \nearrow$ quand HR $\nearrow$ pour une même masse de particules collectées	$\Delta P \nearrow$ brusquement à partir d'une certaine masse de gouttelettes collectées	<u>Colmatage en surface :</u> pas d'influence de HR sur $\Delta P$ <u>Etape de réduction de la surface de filtration :</u> $\Delta P \nearrow$ quand HR $\nearrow$ pour une même masse de particules collectées
	Pas d'influence de $U_f$ sur $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$	Non étudié	$\frac{\Delta P}{\Delta P_0} \nearrow$ quand $U_f \searrow$ pour une même masse de particules collectées
Coefficient d'Épuration	<u>Colmatage en surface :</u> $\nearrow \frac{CE_h}{CE_{\text{vierge sec}}}$ <u>Etape de réduction de la surface de filtration :</u> $\searrow \frac{CE_h}{CE_{\text{vierge sec}}}$	$\searrow \frac{CE_h}{CE_{\text{vierge sec}}}$ au cours du colmatage	<u>Colmatage en surface :</u> $\nearrow \frac{CE_h}{CE_{\text{vierge sec}}}$ <u>Etape de réduction de la surface de filtration :</u> $\searrow \frac{CE_h}{CE_{\text{vierge sec}}}$

## **CHAPITRE 4 : MODELISATION DE L'EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE DURANT SON COLMATAGE SOUS HUMIDITE**

Ce quatrième et dernier chapitre traite de l'aspect modélisation des résultats d'évolution de la perte de charge d'un filtre THE durant son colmatage en présence d'humidité. Dans une première partie, une méthode globale de modélisation de la perte de charge d'un filtre durant la formation du gâteau de particules en présence d'humidité est présentée ; puis, dans une seconde partie, la modélisation du colmatage des filtres plissés est abordée.

### **I. MODELISATION DE LA PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE DURANT LA FORMATION D'UN GATEAU DE PARTICULES**

L'étude bibliographique a mis en évidence la difficulté de modéliser l'évolution de la perte de charge d'un filtre durant son colmatage. En effet, cette dernière dépend de nombreux paramètres tels que la géométrie du filtre, la granulométrie de l'aérosol ou encore la vitesse de filtration. Dans le cas de la filtration en présence d'humidité, la nature hygroscopique de l'aérosol est également importante. De plus, des expériences ont révélé que les particules déposées sur le filtre peuvent ne pas être à l'équilibre avec l'humidité de l'air puisqu'il arrive que la perte de charge du filtre évolue une fois le colmatage achevé ; ainsi, les courbes d'évolution de la perte de charge ne traduisent pas un état d'équilibre du système et dépendent donc des conditions opératoires dont notamment la durée de filtration.

Il n'existe à ce jour aucun modèle phénoménologique de prévision de la perte de charge d'un filtre durant son colmatage qui prenne en compte l'ensemble des paramètres énoncés. Cette partie présente tout d'abord des expériences complémentaires d'évolution de la résistance spécifique de gâteaux de particules d'alumine et de chlorure de sodium exposés à des débits d'air à différents taux d'humidité relative. La méthode globale de prévision de la perte de charge d'un filtre colmaté sous humidité est ensuite énoncée. Enfin, les résultats issus du modèle sont comparés aux valeurs expérimentales.

#### **I.1. Expériences complémentaires**

##### **I.1.1. Evolution temporelle de la résistance spécifique des gâteaux de particules sous humidité**

Des filtres plans ont été colmatés avec les aérosols d'alumine et de chlorure de sodium en air sec ; puis, une fois le colmatage terminé (correspondant à une masse  $m_s$ ), le débit d'air est maintenu à travers les filtres colmatés mais son humidité relative est augmentée. Les évolutions des rapports  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f} \cdot \frac{S_f}{m_s}$ , assimilés à la résistance spécifique  $K_2$  des gâteaux de particules, durant l'exposition au débit d'air humide, sont présentées sur la figure 4-1 et sur la figure 4-2, respectivement pour l'aérosol d'alumine et pour l'aérosol de chlorure de sodium ; la masse surfacique  $\frac{m_s}{S_f}$  de particules déposées sur le filtre est précisée pour chaque essai.

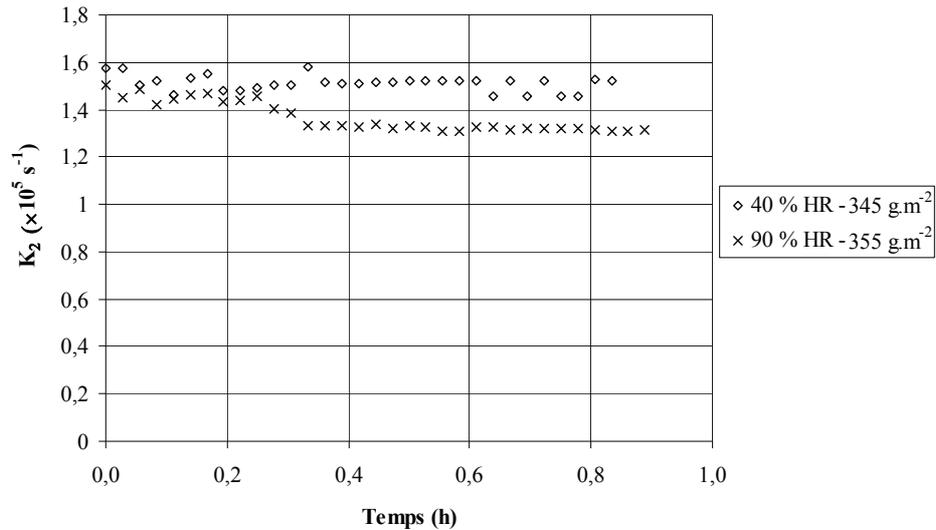


Figure 4-1 : Evolution temporelle de la résistance spécifique de gâteaux de particules d'alumine formés en air sec durant leur exposition à un débit d'air ( $7,0 \text{ cm.s}^{-1}$ ) à différents taux d'humidité relative

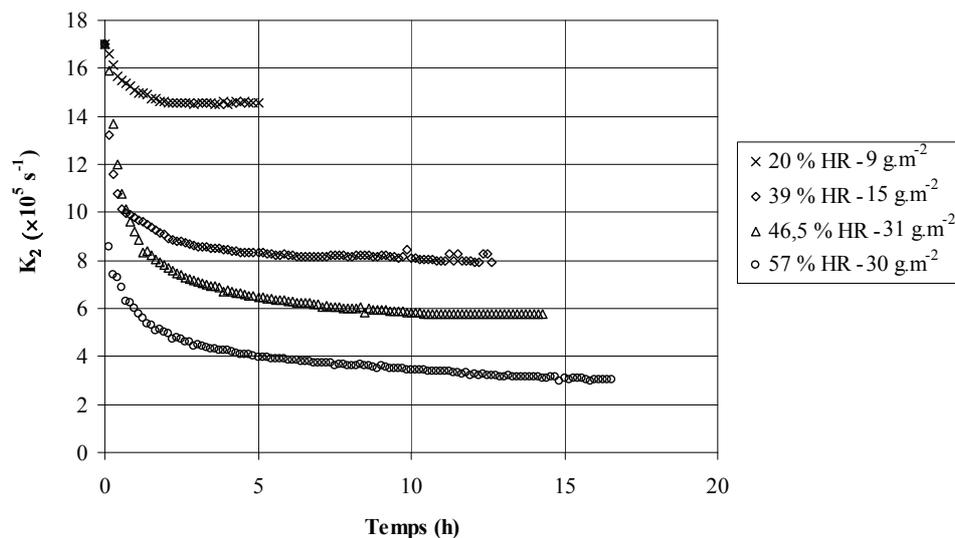


Figure 4-2 : Evolution temporelle de la résistance spécifique de gâteaux de particules de chlorure de sodium formés en air sec durant leur exposition à un débit d'air ( $7,0 \text{ cm.s}^{-1}$ ) à différents taux d'humidité relative

Pour l'aérosol d'alumine tout d'abord, les résultats indiquent que l'exposition d'un filtre à un débit d'air à 40 % d'humidité relative, suite à son colmatage en air sec, ne modifie pas la résistance spécifique du gâteau de particules ; pour un débit d'air à un taux d'humidité relative plus important de 90 %, une diminution d'environ 10 % de la résistance spécifique du gâteau de particules apparaît après plusieurs minutes d'exposition.

Concernant l'aérosol de chlorure de sodium, les résultats expérimentaux révèlent que la résistance spécifique  $K_2$  des gâteaux de particules diminue lorsque le filtre colmaté en air sec est exposé à un débit d'air humide, et cela pour toute la gamme d'étude comprise entre 20 et 57 % d'humidité relative. De plus, la diminution de la résistance spécifique des gâteaux de particules est d'autant plus importante que l'humidité relative de l'air est grande : elle est de 15 % pour un taux d'humidité relative de 20 % et de 80 % pour un taux d'humidité relative de 57 %. Ainsi, la baisse de  $K_2$  ainsi que le temps nécessaire à la stabilisation de sa valeur sont beaucoup plus importants pour l'aérosol de chlorure de sodium que pour celui d'alumine.

### I.1.2. Influence de l'humidité relative de l'air sur la valeur à l'équilibre de la résistance spécifique d'un gâteau de particules exposé à un débit d'air humide

La figure 4–3 représente les valeurs des résistances spécifiques  $K_2$  des gâteaux de particules de chlorure de sodium en fonction de l'humidité relative de l'air pour chaque essai une fois l'équilibre atteint. Les résultats indiquent que les valeurs de  $K_2$  à l'équilibre diminuent de façon linéaire avec l'humidité relative dans la gamme de valeurs étudiée.

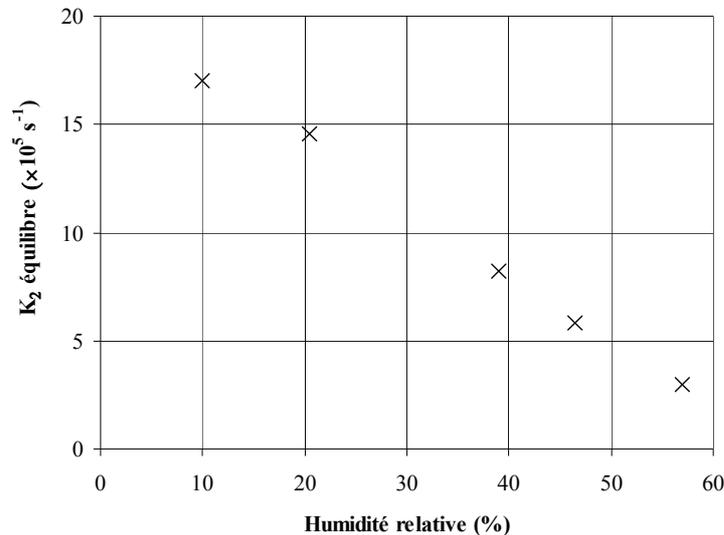


Figure 4–3 : Evolution des valeurs à l'équilibre des résistances spécifiques des gâteaux de particules de chlorure de sodium en fonction de l'humidité relative de l'air

### I.1.3. Vitesse d'évolution de la résistance spécifique d'un gâteau de particules exposé à un débit d'air humide

Les résultats ont révélé que la valeur finale à l'équilibre de la résistance spécifique du gâteau de particules dépend de l'humidité relative de l'air. De plus, la vitesse d'évolution de la résistance spécifique peut être différente en fonction, d'une part de la masse de particules déposées sur le filtre, d'autre part du taux d'humidité relative auquel le filtre colmaté est exposé.

La figure 4–4 présente l'évolution de la résistance spécifique des gâteaux de particules de chlorure de sodium exposés à deux taux d'humidité relative voisins de 53 et 55 %, et pour des masses surfaciques de particules déposées sur les filtres respectivement de 30 et 14  $\text{g.m}^{-2}$ . Les résultats révèlent que pour les deux essais réalisés, la valeur finale à l'équilibre ainsi que la vitesse d'évolution de la résistance spécifique du gâteau de particules soumis à un débit d'air humide sont tout à fait comparables.

La figure 4–5 représente l'évolution de la résistance spécifique de deux gâteaux de particules composés d'environ 30  $\text{g.m}^{-2}$  de particules de chlorure de sodium et exposés à deux taux d'humidité relative de 46,5 et 57 %. Les résultats indiquent que, bien que la masse surfacique de particules collectées sur les filtres soit la même, le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre est différent. En effet, à 46,5 % d'humidité relative la valeur finale à l'équilibre de  $K_2$  est atteinte après environ 10 h d'exposition au débit d'air humide, alors qu'à 57 % d'humidité relative, il faut plus de 15 h pour atteindre l'équilibre, avec dans les deux cas le même débit volumique de filtration à travers les filtres.

Ainsi, pour la suite des travaux, l'hypothèse est faite que l'évolution de  $K_2$  en présence d'un débit d'air humide (donc de vapeur d'eau) dépend du taux d'humidité relative de l'air, mais pas de la masse surfacique de particules collectées sur le filtre. Il s'agit là d'une première approximation pouvant être considérée compte tenu des faibles masses de particules mises en jeu.

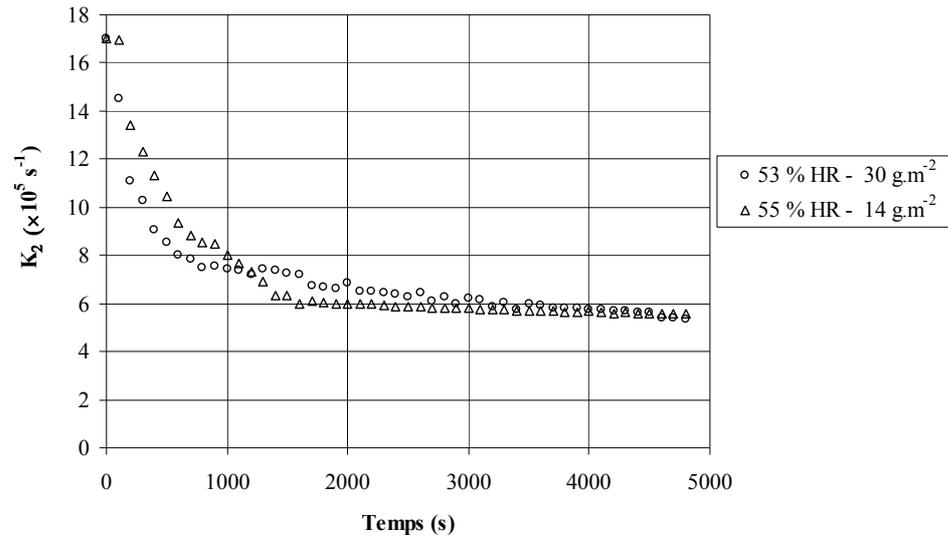


Figure 4-4 : Influence de la masse de particules déposées sur le filtre (14 et  $30 \text{ g.m}^{-2}$ ) sur l'évolution de la résistance spécifique de gâteaux de particules de chlorure de sodium exposés à un flux d'air humide à 53 et 55 % d'HR

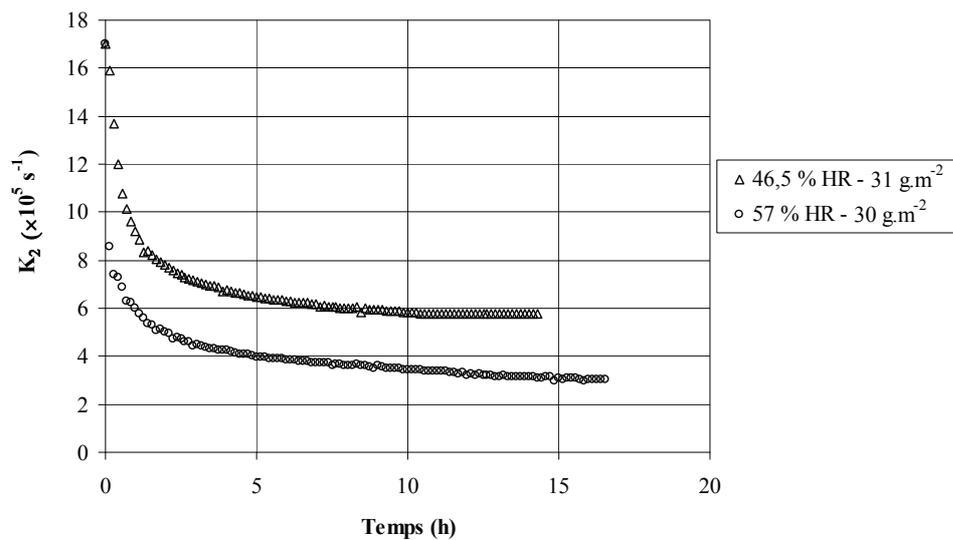


Figure 4-5 : Influence de l'humidité relative de l'air (46,5 et 57 % d'HR) sur l'évolution de la résistance spécifique de gâteaux constitués de la même masse de particules de chlorure de sodium ( $30 \text{ g.m}^{-2}$ )

## I.2. Enoncé de la méthode globale de modélisation

L'objectif de cette méthode globale de modélisation est de prévoir l'évolution de la perte de charge d'un filtre durant son colmatage avec formation d'un gâteau de particules à sa surface, en fonction de l'humidité relative de l'air.

Cette méthode suppose que, durant le colmatage, les particules sont déposées à la surface du filtre en couches successives de même épaisseur et de même masse. Les particules se déposent initialement sur le filtre de la même façon quelle que soit l'humidité de l'air ; puis, une fois les particules déposées, le dépôt est modifié par la présence d'humidité en fonction de l'adsorption de la vapeur d'eau contenue dans l'air par les particules constituant le gâteau. Ainsi, à un instant  $t$  du colmatage, chaque couche de particules est à un état d'équilibre différent correspondant au temps de contact de l'aérosol avec l'air humide.

Avant de présenter de façon plus détaillée la méthode globale de modélisation, certaines hypothèses doivent être posées :

- les particules se déposent à la surface du filtre en formant un gâteau, donc le dépôt des particules en profondeur au niveau des fibres est négligé,
- dans le cas d'un filtre plissé, la réduction de la surface de filtration doit être négligeable,
- le gâteau de particules est supposé homogène, notamment en termes de compacité,
- l'épaisseur du gâteau de particules est la même quelle que soit l'humidité relative à laquelle il se forme.

La relation (1-40), rappelée ci-dessous, exprime selon Novick (1992) la perte de charge à travers un filtre colmaté :

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_G$$

avec

$$\Delta P_G = K_2 \cdot \frac{m_s \cdot U_f}{S_f} \quad (4-1)$$

L'épaisseur du gâteau de particules en fin de colmatage est décomposée en N couches successives de même épaisseur  $\Delta e_g$  et de même masse de particules  $\Delta m_s$  ; ainsi, la perte de charge à travers le filtre colmaté s'écrit :

$$\Delta P = \Delta P_0 + \sum_{k=1}^N \Delta P_k \quad (4-2)$$

Pour un temps total de filtration  $t_f$ , chaque couche est formée en un temps  $\Delta t$ , avec :

$$t_f = N \cdot \Delta t \quad (4-3)$$

L'adsorption de la vapeur d'eau par le gâteau de particules est appliquée à chaque couche de particules à travers la résistance spécifique  $K_2$  du gâteau de particule qui évolue avec le temps ; ainsi, la perte de charge d'une couche de particules à un temps  $t$  s'écrit :

$$\Delta P_k(t) = K_2(t) \cdot \frac{\Delta m_s \cdot U_f}{S_f} \quad (4-4)$$

Chaque couche de particules conduit donc à une perte de charge qui dépend de son état d'équilibre avec l'humidité de l'air, i. e. du temps d'interaction entre l'aérosol déposé et l'air humide :

- la couche N, qui est la dernière couche de particules déposées à la surface du filtre, n'est pas à l'équilibre,
- la couche 1 est à un degré d'équilibre correspondant au temps :  $t_f - \Delta t$ ,
- la couche j est à un temps d'équilibre correspondant au temps :  $t_f - j \cdot \Delta t$ .

Ainsi, la perte de charge à travers un filtre colmaté sous humidité s'écrit :

$$\Delta P = \Delta P_0 + \frac{U_f}{S_f} \cdot \Delta m_s \sum_{k=1}^N K_2(t_f - k \cdot \Delta t) \quad (4-5)$$

La méthode de modélisation implique donc de connaître l'évolution temporelle de  $K_2$  pour le taux d'humidité relative de l'air considéré.

### I.3. Présentation des résultats

#### I.3.1. Choix des paramètres

La méthode de travail nécessite de fixer le nombre de couches N constituant le gâteau ; celui-ci s'exprime en fonction de l'épaisseur du gâteau de particules par la relation :

$$N = \frac{e_g}{\Delta e_g} \quad (4-6)$$

Soit, en intégrant l'expression (1-44) qui exprime l'épaisseur du gâteau de particules, le nombre de couches peut s'écrire :

$$N = \frac{m_s}{\rho_p \cdot \alpha_g \cdot S_f \cdot \Delta e_g} \quad (4-7)$$

Une estimation de l'épaisseur de couche  $\Delta e_g$  peut être faite à partir du diamètre des particules collectées selon la relation :

$$\Delta e_g = x \cdot d_p \quad (4-8)$$

Les aérosols utilisés durant les essais étant polydispersés, c'est le diamètre médian en masse de l'aérosol qui a été retenu dans cette relation. Pour la compacité du gâteau  $\alpha_g$ , ce sont les valeurs expérimentales obtenues en air sec qui ont été utilisées ; ainsi, la valeur de  $x$  a été fixée à 10 pour l'aérosol d'alumine et à 20 pour l'aérosol de chlorure de sodium afin d'avoir un nombre de couches  $N$  satisfaisant.

Le pas de temps  $\Delta t$  est ensuite fixé à l'aide de la relation (4-3) en fonction du nombre de couche  $N$ , déterminé avec la relation précédente, et de la durée de filtration  $t_f$ . Enfin, la masse de particules  $\Delta m_s$  déposées sur chaque couche est déterminée à partir de  $\Delta t$ , de la durée de filtration  $t_f$  et de la masse totale de particules  $m_s$  déposées sur le filtre en fin de colmatage selon la relation :

$$\Delta m_s = \frac{\Delta t \cdot m_s}{t_f} \quad (4-9)$$

### I.3.2. Evolution de la résistance spécifique du gâteau de particules en fonction du temps

Les évolutions des résistances spécifiques  $K_2$  des gâteaux de particules en fonction du temps durant leur exposition à des débits d'air à différents taux d'humidité relative présentées dans le paragraphe I.1.1 peuvent s'exprimer sous la forme :

$$K_2(t) = K_2(\text{air sec}) - \frac{t}{a + b \cdot t} \quad (4-10)$$

La méthode de modélisation consistant à considérer chaque épaisseur de gâteau de façon indépendante, la vitesse d'évolution de la résistance spécifique à considérer doit être celle d'une tranche de gâteau de masse  $\Delta m_s$ . Néanmoins, le paragraphe précédent a démontré que la vitesse d'évolution de  $K_2$  dépend essentiellement de la valeur d'humidité relative et peu de la masse de particules déposées sur le filtre, ce qui a été établi jusqu'à  $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ . Donc les vitesses d'évolution obtenues pour un gâteau de particules de masse  $m_s$  peuvent être appliquées à une couche de particules de masse  $\Delta m_s$ .

Les coefficients d'ajustement  $a$  et  $b$  déterminés expérimentalement aux différents taux d'humidité relative étudiés pour l'aérosol d'alumine et l'aérosol de chlorure de sodium sont rassemblés dans le tableau 4-1.

La figure 4-6 représente à nouveau les évolutions des résistances spécifiques des gâteaux de particules d'alumine et de chlorure de sodium exposés à des débits d'air à différents taux d'humidité relative, ainsi que leurs courbes d'ajustement.

Tableau 4-1 : Coefficients d'ajustement a et b pour les particules d'alumine et de chlorure de sodium en fonction de l'humidité relative

HR (%)	a ( $\times 10^{-5} \text{ s}^2$ )	b ( $\times 10^{-8} \text{ s}$ )
Alumine		
40	0	$\infty$
90	3000	4500
Chlorure de sodium		
20	350	395
39	90	110
46,5	150	86
57	75	71

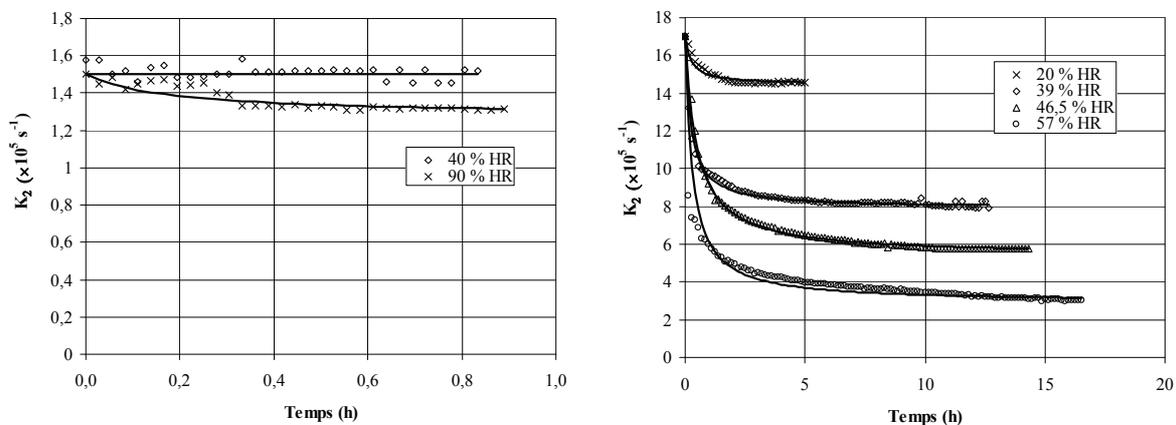


Figure 4-6 : Evolutions temporelles et courbes d'ajustement des résistances spécifiques des gâteaux de particules exposés à des débits d'air à différents taux d'humidité relative : à gauche d'alumine et à droite de chlorure de sodium

Durant le colmatage en air sec, l'évolution du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  des filtres plans en fonction de la masse surfacique de particules déposées n'est linéaire qu'à partir d'une certaine masse surfacique de particules déposées  $\left(\frac{m_s}{S_f}\right)_{\text{limite}}$ , en particulier avec l'aérosol d'alumine (Cf. figure 3-3). Dans cette zone, appelée filtration en surface, la résistance spécifique  $K_2$  du gâteau de particules est constante ; c'est cette valeur de  $K_2$  qui a été utilisée pour déterminer les coefficients d'ajustement a et b présentés dans le tableau 4-1. Avant cette zone, i. e. lorsque le gâteau de particules n'est pas complètement constitué, l'évolution du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  en fonction de la masse surfacique de particules déposées n'est pas linéaire ; ainsi, la valeur de  $K_2$  est différente de celle obtenue durant la filtration en surface et évolue en fonction de la masse surfacique de particules déposées.

La valeur de  $K_2$  en air sec n'est donc pas constante sur l'ensemble du colmatage. Le modèle développé qui nécessite comme donnée d'entrée la valeur de  $K_2$  en air sec doit tenir compte de son évolution au cours du colmatage. Ainsi, pour les valeurs de  $K_2$  comprises avant la zone de filtration en surface, les coefficients d'ajustement a et b doivent être recalculés. Pour une masse surfacique  $\frac{m_s'}{S_f}$  inférieure à la valeur limite  $\left(\frac{m_s}{S_f}\right)_{\text{limite}}$  et correspondant à une résistance spécifique  $K_2'$ , les coefficients d'ajustement a' et b' peuvent être calculés avec les relations suivantes :

$$b' = \frac{b.K_2}{K_2'} \text{ et } a' = \frac{a.K_2}{K_2'} \quad (4-11)$$

avec  $a$  et  $b$  les valeurs présentées dans le tableau 4-1, correspondant à la zone de filtration en surface, et calculées d'après  $K_2$ , la résistance spécifique du gâteau de particules déterminée à partir des résultats expérimentaux durant la phase de filtration en surface.

### I.3.3. Comparaison modèle – expérience

La figure 4-7 et la figure 4-8, respectivement pour l'aérosol d'alumine et l'aérosol de chlorure de sodium, regroupent les courbes d'évolution du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  calculées (notées mod), ainsi que les courbes expérimentales au taux d'humidité relative le plus proche de celui utilisé dans le modèle (notées exp). Les valeurs calculées sont déterminées en utilisant les conditions opératoires des essais expérimentaux en air humide, en termes de durée de filtration et de masse de particules déposées.

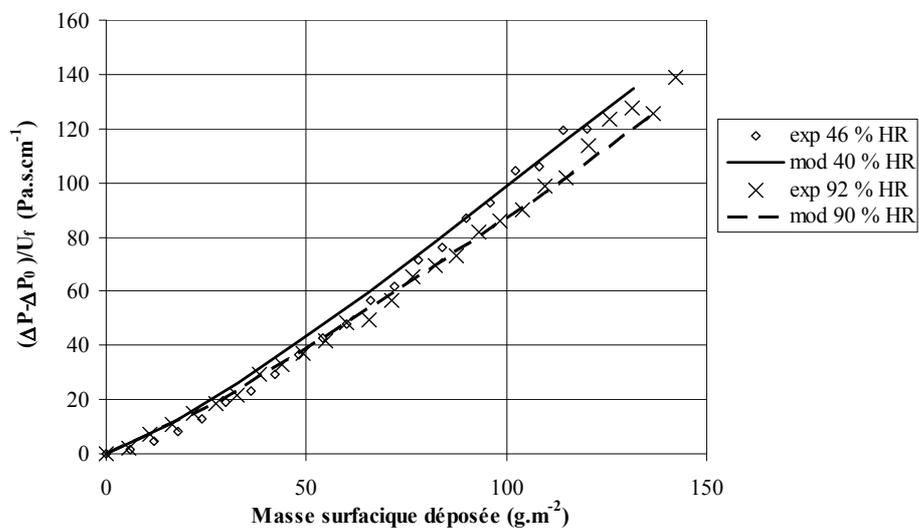


Figure 4-7 : Comparaison entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales de la perte de charge d'un filtre durant son colmatage avec l'aérosol d'alumine à différents taux d'humidité relative

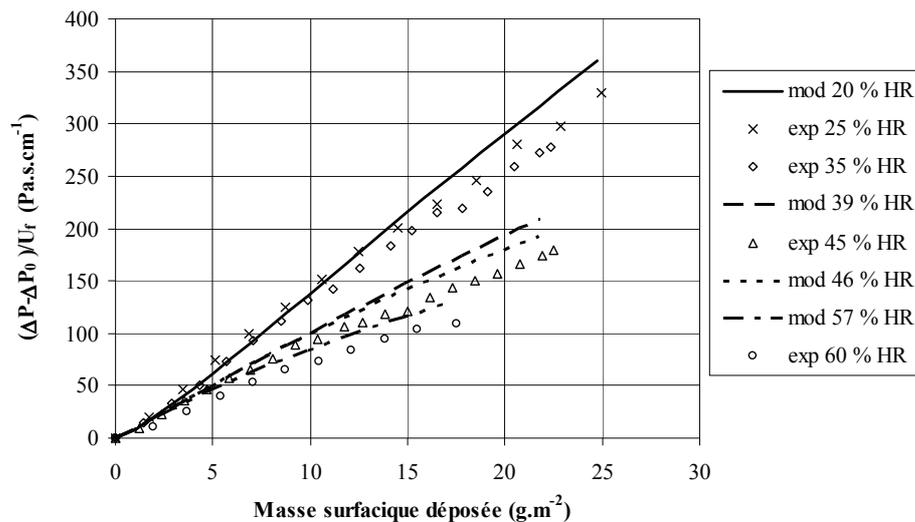


Figure 4-8 : Comparaison entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales de la perte de charge d'un filtre durant son colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à différents taux d'humidité relative inférieurs au point de déliquescence

Pour l'aérosol d'alumine, les résultats révèlent que les courbes issues du modèle permettent une bonne estimation de l'évolution du rapport  $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$  en fonction de la masse surfacique de particules

déposées. La même remarque peut être faite pour l'aérosol de chlorure de sodium ; l'écart maximal entre les résultats expérimentaux et ceux issus de la méthode de modélisation étant de 30 %.

La figure 4–9 regroupe par ailleurs les résistances spécifiques des gâteaux de particules de chlorure de sodium obtenues expérimentalement, celles calculées à partir du modèle en fonction de l'humidité relative durant le colmatage ainsi que les valeurs à l'équilibre. Il convient de préciser à nouveau que les valeurs calculées sont déterminées en utilisant les durées de filtration caractéristiques des colmatages expérimentaux.

Les résultats indiquent que les valeurs issues du modèle s'intègrent de façon satisfaisante aux valeurs expérimentales. Ainsi, cela témoigne que la méthode utilisée permet d'obtenir une bonne estimation de la résistance spécifique d'un gâteau de particules formé en air humide. Les résultats révèlent également, pour les conditions d'essais, que l'écart entre les valeurs de  $K_2$  à l'équilibre et les valeurs expérimentales ou issues du modèle est d'autant plus important que l'humidité relative augmente (les valeurs sont d'ailleurs confondues jusqu'à 20 % d'humidité relative). Cela permet de mettre en évidence que la valeur de  $K_2$  dépend de la durée de filtration, en particulier lorsque l'humidité de l'air augmente.

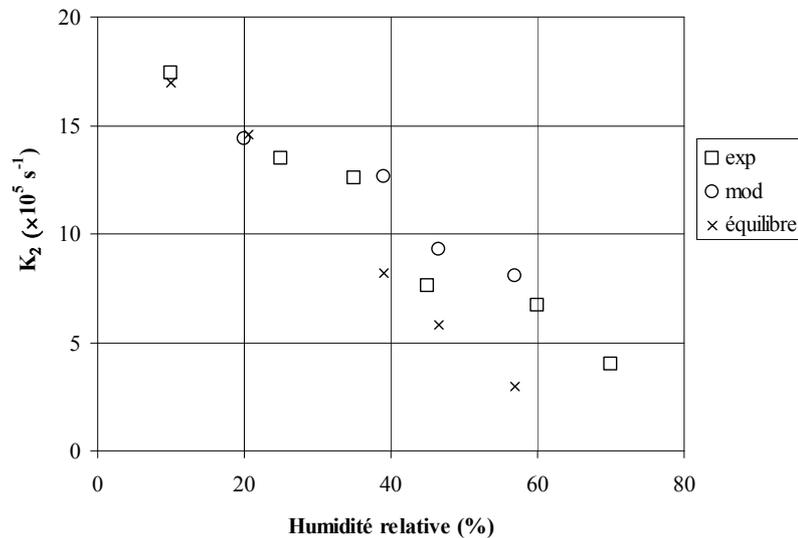


Figure 4–9 : Résistances spécifiques expérimentales et calculées pour un gâteau de particules de chlorure de sodium en fonction de l'humidité relative du colmatage

#### I.3.4. Influence de la durée de filtration

L'influence de la durée de filtration sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre colmaté avec l'aérosol de chlorure de sodium est illustrée à partir de simulations faites pour un taux d'humidité relative pris arbitrairement à 39 %. Le temps de filtration  $t_f$  mis en œuvre durant l'essai (8300 s) est comparé à deux autres valeurs :  $2 \times t_f$  et  $\frac{t_f}{10}$ , ainsi qu'à l'évolution de la perte de charge en air sec et à celle correspondant à la valeur de  $K_2$  à l'équilibre. Les résultats sont représentés sur la figure 4–10.

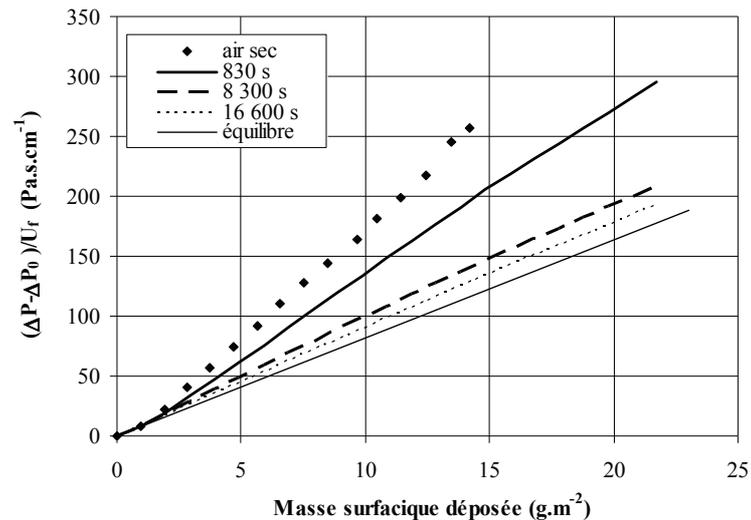


Figure 4–10 : Influence de la durée de filtration sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre plan colmaté à 39 % d'humidité relative avec l'aérosol de chlorure de sodium et calculée à partir du modèle

Les résultats confirment l'importance du temps de filtration sur l'évolution de la perte de charge du filtre. En effet, pour une masse surfacique de particules déposées, plus la durée de filtration est grande, plus la résistance spécifique du gâteau de particules formé diminue jusqu'à atteindre une valeur d'équilibre ; ceci est vrai dans la mesure où le pas de temps  $\Delta t$ , pendant lequel une couche de particules est formée, reste inférieur au temps nécessaire pour atteindre l'équilibre au taux d'humidité relative correspondant. Le temps de filtration est donc un paramètre essentiel à prendre en compte lors de la modélisation du colmatage d'un filtre en présence d'humidité et notamment avec un aérosol hygroscopique.

La figure 4–10 souligne à nouveau que c'est en air sec que l'évolution de la perte de charge d'un filtre est la plus pénalisante. Par conséquent, la présence d'humidité ne nuit pas au maintien des débits de ventilation, dans le cas bien sûr où la réduction de la surface de filtration du filtre reste négligeable et que l'aérosol est sous forme solide.

### Bilan

Une méthode globale d'estimation de la perte de charge d'un filtre durant son colmatage en présence d'humidité a été proposée. Cette méthode est applicable durant l'étape de filtration en surface, i. e. pendant la constitution d'un gâteau de particules à la surface du filtre sans réduction de la surface de filtration, et pour des taux d'humidité relative inférieurs au point de déliquescence de l'aérosol s'il est hygroscopique. Elle nécessite de connaître, d'une part l'évolution de la résistance spécifique du gâteau de particules en air sec, d'autre part son évolution lorsque le gâteau est soumis à un flux d'air humide. Les résultats ont montré une bonne concordance avec les valeurs expérimentales. L'influence de la durée de filtration a été confirmée sur l'état d'équilibre du gâteau de particules avec l'humidité de l'air, en particulier avec un aérosol hygroscopique.

La prochaine partie de ce chapitre porte sur la modélisation de l'évolution de la perte de charge de filtres à petits plis durant leur colmatage.

## II. MODELISATION DE L'EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE PLISSE

Pour modéliser la perte de charge d'un filtre plissé durant son colmatage il faut connaître, d'une part l'évolution de la résistance spécifique du gâteau de particules, d'autre part l'évolution de la surface de filtration.

Le modèle de Del Fabbro (2001) a été recensé dans l'étude bibliographique pour prédire l'évolution de la perte de charge d'un filtre à petits plis durant son colmatage. Il a été établi à partir de colmatages de filtres en air sec et avec des particules microniques. De plus, la complexité du modèle développé, notamment la nécessité de renseigner la résistance aéraulique du medium filtrant tout au long du colmatage, rend son utilisation difficile. Laborde *et al.* (2002) ont proposé une relation permettant de modéliser le colmatage des filtres plissés à partir de la relation de Novick (1992) et du terme de réduction de la surface de filtration utilisé dans le modèle de Del Fabbro (2001). C'est à partir de cette relation que l'influence de l'humidité relative de l'air a tenté d'être intégrée.

Cette partie s'intéresse tout d'abord aux résultats de colmatage en air sec, puis présente les travaux effectués sur l'intégration de l'influence de l'humidité relative de l'air.

### II.1. Modélisation de la perte de charge en air sec

Laborde *et al.* (2002) intègrent au modèle de Novick (1992), utilisable pour les filtres plans, le terme de réduction de la surface de filtration utilisé par Del Fabbro (2001) qui est développé dans le § II.3.2 du chapitre 1. La relation proposée est la suivante :

$$\Delta P = \left[ \Delta P_0 + \left( \frac{36h_k \cdot \alpha_g \cdot \mu \cdot U_f \cdot m_s}{Cu \cdot (1 - \alpha_g)^3 \cdot d_p^2 \cdot \rho_p \cdot S_f} \right) \right] \cdot \left( 1 - \frac{2m_s}{\rho_p \cdot \alpha_g \cdot p \cdot S_f} \right)^{-15/Re_f} \quad (4-12)$$

L'exposant appliqué au terme de réduction de la surface de filtration a été optimisé de façon empirique à partir des résultats expérimentaux de Del Fabbro (2001).

En considérant la résistance spécifique du gâteau de particules de façon globale, la relation s'écrit :

$$\Delta P = \left[ \Delta P_0 + \left( K_2 \cdot \frac{U_f \cdot m_s}{S_f} \right) \right] \cdot \left( 1 - \frac{2m_s}{\rho_p \cdot \alpha_g \cdot p \cdot S_f} \right)^{-15/Re_f} \quad (4-13)$$

Ce modèle implique une réduction de la surface de filtration homogène sur toute la hauteur du pli dont la vitesse d'évolution dépend de  $Re_f$ , i. e. de paramètres aérauliques tels que la vitesse de filtration et le pas du pli, mais pas de la granulométrie de l'aérosol.

Les valeurs de perte de charge issues de la relation (4-13) ont été comparées aux valeurs expérimentales des filtres plissés obtenues en air sec ( $HR \leq 10\%$ ) et pour différentes vitesses de filtration. La figure 4-11 présente les résultats pour l'aérosol d'alumine et la figure 4-12 pour l'aérosol de chlorure de sodium. Pour les calculs, la perte de charge initiale du filtre est estimée à partir de la relation (1-18) de Thomas (Callé-Chazelet *et al.*, 2008 a), les valeurs de la résistance spécifique et de la compacité du gâteau de particules sont celles obtenues expérimentalement sur les filtres plans.

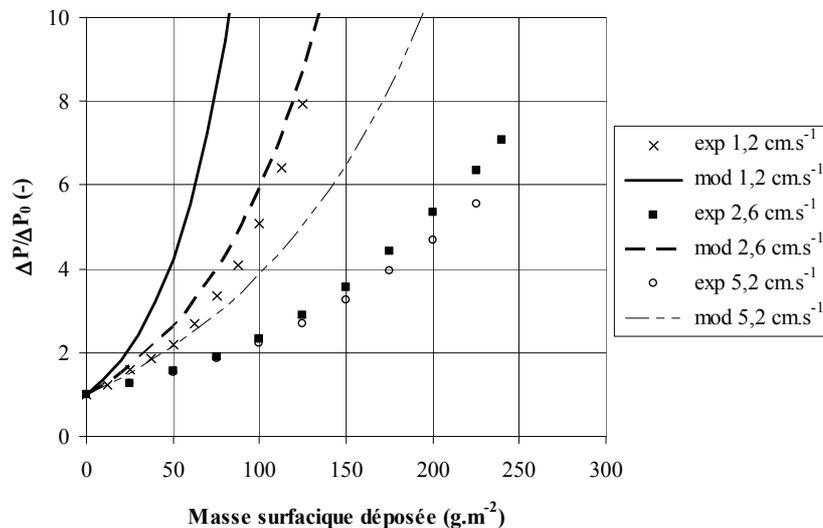


Figure 4-11 : Comparaison de l'évolution de la perte de charge calculée et expérimentale d'un filtre à petits plis durant son colmatage en air sec avec l'aérosol micronique d'alumine à différentes vitesses de filtration

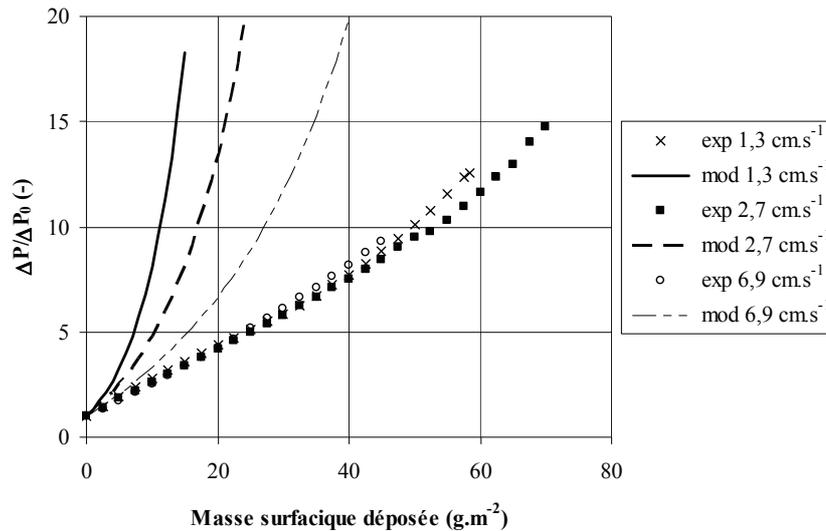


Figure 4-12 : Comparaison de l'évolution de la perte de charge calculée et expérimentale d'un filtre à petits plis durant son colmatage en air sec avec l'aérosol submicronique de chlorure de sodium à différentes vitesses de filtration

Pour l'aérosol d'alumine, les résultats indiquent que le modèle utilisé permet de retranscrire de façon satisfaisante l'allure de l'évolution expérimentale de la perte de charge des filtres plissés durant leur colmatage, ainsi que l'influence de la vitesse de filtration, mais surestime néanmoins les valeurs.

Pour l'aérosol de chlorure de sodium, les résultats révèlent que le modèle de colmatage n'est pas satisfaisant. En effet, la figure 4-12 indique que le modèle surestime fortement les valeurs expérimentales de perte de charge (80 % pour la plupart des valeurs à 1,3 cm.s<sup>-1</sup>). De plus, les résultats expérimentaux montrent que la vitesse de filtration n'a pas ou très peu d'influence sur l'évolution du rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  pour la gamme d'étude considérée en termes de masses surfaciques de particules déposées. Or, le modèle implique que, comme pour les particules microniques, le rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  augmente plus rapidement lorsque la vitesse de filtration diminue.

Ainsi, le modèle, et en particulier le terme de réduction de la surface de filtration qui a été optimisé à partir de résultats expérimentaux de colmatage avec un aérosol micronique, n'est pas applicable avec un aérosol submicronique. En effet, le terme de réduction de la surface de filtration est beaucoup trop simpliste. Il devrait tenir compte de la granulométrie de l'aérosol et de la vitesse de filtration de façon couplée à l'aide du nombre de Stokes par exemple.

Ceci met en évidence la difficulté de modéliser le colmatage d'un filtre plissé même en air sec. Il semble donc anticipé de vouloir modéliser le colmatage d'un filtre plissé sous humidité. Néanmoins, la méthode de modélisation utilisée dans le paragraphe précédent peut a priori être appliquée pour modéliser le colmatage d'un filtre plissé lorsque la réduction de la surface de filtration est négligeable.

## II.2. Modélisation de la perte de charge en air humide

Les résultats numériques de l'évolution du rapport  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  en fonction de la masse surfacique de particules déposées sont calculés avec la relation (4-13) et pour  $K_2$  avec la relation (4-10) et les valeurs de a et b du tableau 4-1. La figure 4-13 et la figure 4-14 comparent les résultats issus du modèle avec les résultats expérimentaux, à la vitesse nominale de filtration et pour différents taux d'humidité relative, respectivement pour l'aérosol d'alumine et l'aérosol de chlorure de sodium. Pour les deux aérosols, la résistance spécifique du gâteau de particules en air sec utilisée dans le modèle est déduite par ajustement des résultats expérimentaux sur les filtres plissés dans la zone de filtration en surface.

L'influence de l'humidité relative de l'air dans le modèle employé n'intervient donc que sur la résistance spécifique du gâteau de particules et pas sur le terme de réduction de la surface de filtration (puisque les valeurs de la compacité mesurées dépendent peu de l'humidité).

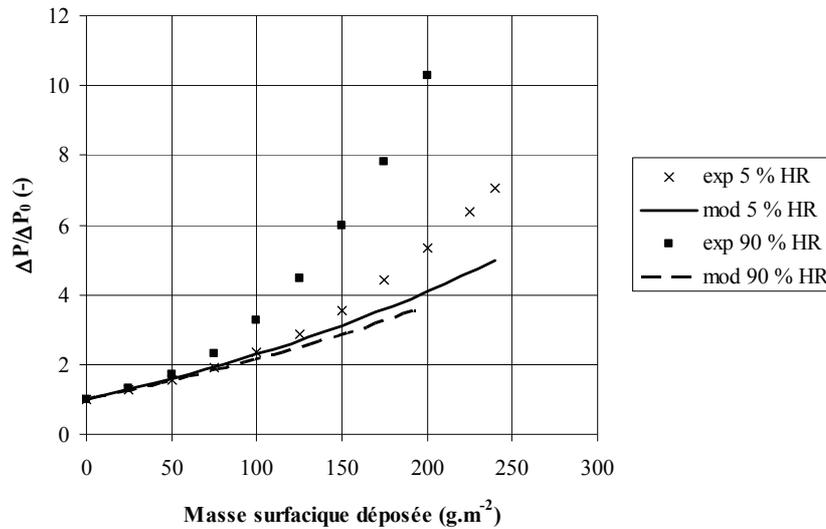


Figure 4-13 : Comparaison de l'évolution de la perte de charge calculée et expérimentale d'un filtre à petits plis durant son colmatage avec l'aérosol d'alumine à la vitesse nominale de filtration ( $2,6 \text{ cm.s}^{-1}$ ) et à différents taux d'humidité relative

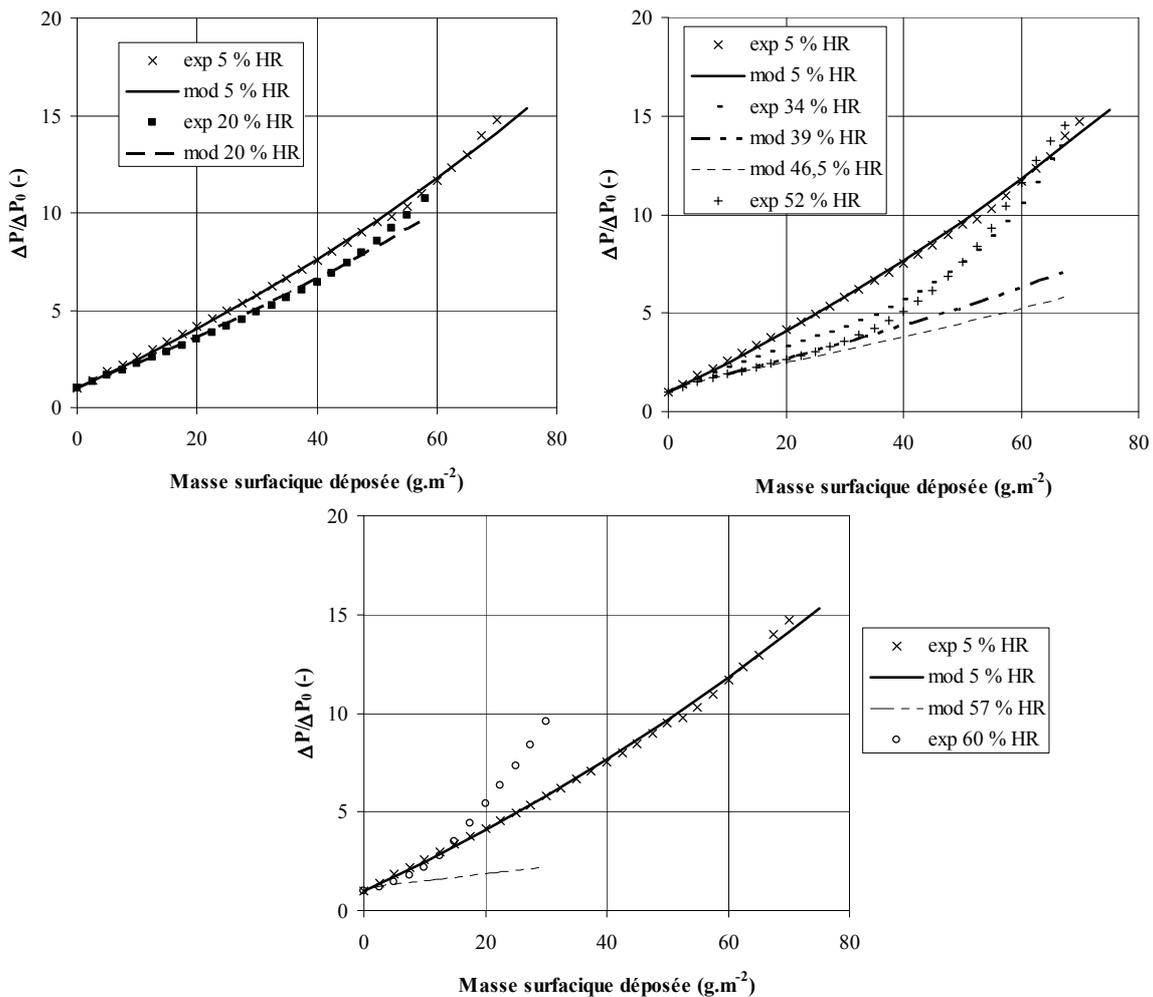


Figure 4-14 : Comparaison de l'évolution de la perte de charge calculée et expérimentale d'un filtre à petits plis durant son colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à la vitesse nominale de filtration ( $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$ ) et à différents taux d'humidité relative inférieurs au point de déliquescence

Pour l'aérosol micronique d'alumine, les résultats expérimentaux ne permettent pas de mettre en évidence une influence de l'humidité relative entre 5 et 90 % durant la phase de filtration en surface, i. e. pour une masse surfacique de particules déposées inférieure à  $50 \text{ g.m}^{-2}$ ; les valeurs issues du modèle montrent également peu d'influence de l'humidité en début de colmatage. Les résultats expérimentaux révèlent qu'à 90 % d'humidité relative, la surface de filtration diminue de façon significative au-delà de  $50 \text{ g.m}^{-2}$ , ce que le modèle ne traduit pas.

Pour l'aérosol de chlorure de sodium, les résultats indiquent que pour un taux d'humidité relative de 20 %, les valeurs issues du modèle permettent de décrire les valeurs expérimentales de façon tout à fait satisfaisante. Cela confirme que la diminution de la perte de charge du filtre plissé, lorsque l'humidité relative de l'air passe de 5 à 20 %, pour une même masse de particules déposées au début du colmatage, peut bien être attribuée à une diminution de la résistance spécifique du gâteau de particules similaire à celle observée sur les filtres plans.

Pour des taux d'humidité relative compris entre 34 et 52 %, les résultats révèlent que les valeurs issues du modèle décrivent relativement bien l'évolution expérimentale des valeurs de  $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$  pour des masses surfaciques de particules déposées inférieures à  $30 \text{ g.m}^{-2}$ ; au-delà, l'allure des courbes expérimentales traduit une réduction de la surface de filtration insuffisamment prise en compte par le modèle.

A un taux d'humidité relative de 60 %, l'allure de la courbe expérimentale indique que la réduction de la surface de filtration s'opère très rapidement pour une faible masse de particules déposées (inférieure à  $10 \text{ g.m}^{-2}$ ); ainsi, le modèle employé n'est pas approprié, ce qui n'est pas surprenant compte tenu du phénomène de collage des plis intervenant dans cette zone d'humidité relative.

L'ensemble des résultats met en évidence la nécessité d'intégrer, dans le modèle d'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé, l'influence de l'humidité relative de l'air dans le terme de réduction de la surface de filtration.

### II.3. Modélisation de la réduction de la surface de filtration

Dans la gamme de vitesses étudiée, la modélisation du colmatage d'un filtre plissé peut être envisagée à l'aide de l'évolution du colmatage d'un filtre plan et d'une simple corrélation empirique de réduction de la surface de filtration dépendant, pour une géométrie de pli donnée, de la granulométrie de l'aérosol, de la vitesse de filtration et de l'humidité relative de l'air.

En effet, selon Novick (1992) la perte de charge d'un filtre durant le colmatage peut s'écrire :

$$\Delta P = \Delta P_0 + K_2 \cdot \frac{m_s}{S_f} \cdot U_f \quad (4-14)$$

De plus le débit volumique peut être considéré comme constant en amont et en aval du filtre; ainsi, en reprenant la relation (1-47), l'égalité suivante peut être écrite :

$$U_{f_0} \cdot S_{f_0} = U_f \cdot S_f$$

La perte de charge du filtre peut alors s'écrire :

$$\Delta P = \Delta P_0 + K_2 \cdot U_{f_0} \cdot S_{f_0} \cdot \frac{m_s}{S_f^2} \quad (4-15)$$

La surface de filtration  $S_f$  a donc pour expression :

$$S_f = \sqrt{\frac{m_s \cdot K_2 \cdot U_{f_0} \cdot S_{f_0}}{\Delta P - \Delta P_0}} \quad (4-16)$$

Il est donc possible, à partir des résultats expérimentaux, d'obtenir l'évolution de la surface de filtration du filtre en fonction de la masse surfacique de particules déposées pour des conditions opératoires données. En effet, la valeur de  $K_2$  est estimée au début du colmatage, lorsque la surface de filtration du filtre est peu différente de celle du filtre vierge, puis sa valeur est supposée constante tout au long du colmatage.

La figure 4–15 et la figure 4–16 présentent les courbes d'évolution de la surface de filtration des filtres plissés durant leur colmatage avec respectivement l'aérosol d'alumine et l'aérosol de chlorure de sodium aux différents taux d'humidité relative et de vitesses de filtration étudiés.

Pour l'aérosol micronique d'alumine, les résultats confirment que jusqu'à une certaine masse de particules déposées sur le filtre, la surface de filtration évolue peu ; puis, la surface de filtration diminue d'autant plus rapidement que l'humidité relative de l'air est grande et que la vitesse initiale de filtration est faible.

Pour l'aérosol de chlorure de sodium, les résultats expérimentaux sont plus difficilement exploitables. En effet, les courbes d'évolution de la perte de charge des filtres plissés sous humidité ont révélé un point d'inflexion durant la formation du gâteau de particules. Ainsi, en exprimant la surface de filtration à partir de la résistance spécifique du gâteau de particules, cela entraîne une baisse artificielle de la surface de filtration observable sur la figure 4–16. La réduction de la surface de filtration réelle apparaît sur les courbes au-delà de 40 g.m<sup>-2</sup> de particules déposées (sauf à 60 % d'humidité relative où la réduction apparaît plus tôt). Les résultats confirment alors, comme pour l'aérosol d'alumine, que la surface de filtration diminue plus rapidement lorsque l'humidité relative de l'air augmente.

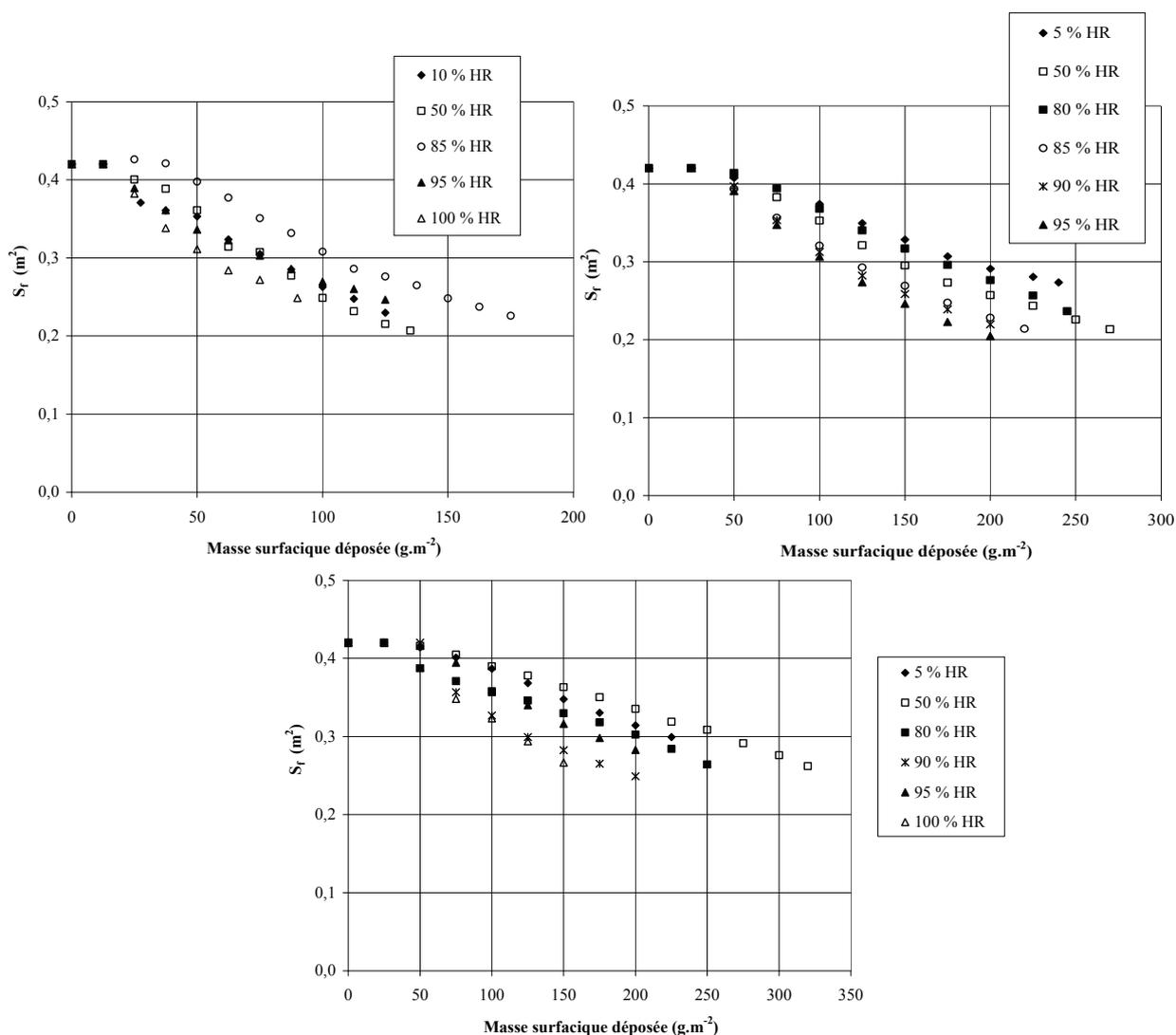


Figure 4–15 : Evolution calculée de la surface de filtration d'un filtre plissé durant son colmatage avec l'aérosol d'alumine à différents taux d'humidité relative et différentes vitesses de filtration : en haut à gauche 1,2 cm.s<sup>-1</sup>, en haut à droite 2,6 cm.s<sup>-1</sup> et en bas entre 5,0 et 5,2 cm.s<sup>-1</sup>

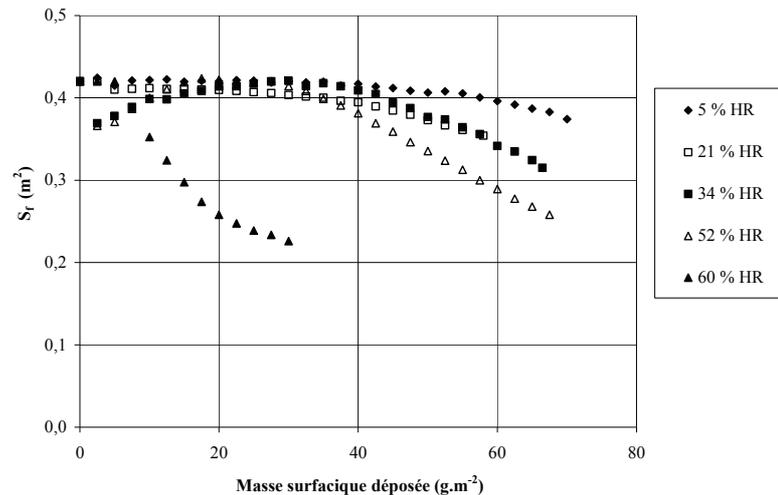


Figure 4-16 : Evolution calculée de la surface de filtration d'un filtre plissé durant son colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à différents taux d'humidité relative et à  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$

Les courbes d'évolution de la surface de filtration en fonction de la masse surfacique de particules déposées peuvent se modéliser sous la forme :

$$S_f \left( \frac{m_s}{S_{f_0}} \right) = S_{f_0} - c \cdot \exp \left( - \frac{d}{\frac{m_s}{S_{f_0}}} \right) \quad (4-17)$$

Le coefficient  $d$  influe sur la masse surfacique déposée à partir de laquelle la surface de filtration diminue de façon importante ; le coefficient  $c$  permet d'ajuster la pente de la réduction de la surface de filtration. Les coefficients  $c$  et  $d$  doivent dépendre de la granulométrie de l'aérosol, de la vitesse de filtration, de l'humidité relative de l'air, ainsi que des paramètres de plissage du filtre plissé.

Le tableau 4-2 synthétise les valeurs pour les coefficients  $c$  et  $d$  pour l'aérosol d'alumine à 5 et 95 % d'humidité relative à différentes vitesses de filtration, ainsi que pour l'aérosol de chlorure de sodium entre 5 et 52 % d'humidité relative ; la figure 4-17 et la figure 4-18 présentent les résultats des valeurs expérimentales et issues de la relation empirique (4-17), respectivement pour l'aérosol d'alumine et de chlorure de sodium.

Tableau 4-2 : Coefficients d'ajustement de l'évolution de la surface de filtration d'un filtre plissé colmaté avec les aérosols d'alumine et de chlorure de sodium

HR (%)	$U_{f_0}$ (cm.s <sup>-1</sup> )	$c$ (m <sup>2</sup> )	$d$ (kg.m <sup>-2</sup> )
Alumine			
5	1,2	0,34	0,08
5	2,6	0,30	0,17
5	5,2	0,33	0,23
95	1,2	0,27	0,06
95	2,6	0,48	0,15
95	5,2	0,46	0,23
Chlorure de sodium			
5	2,7	1,50	0,25
21	2,7	1,60	0,18
34	2,7	2,50	0,21
52	2,7	2,50	0,18

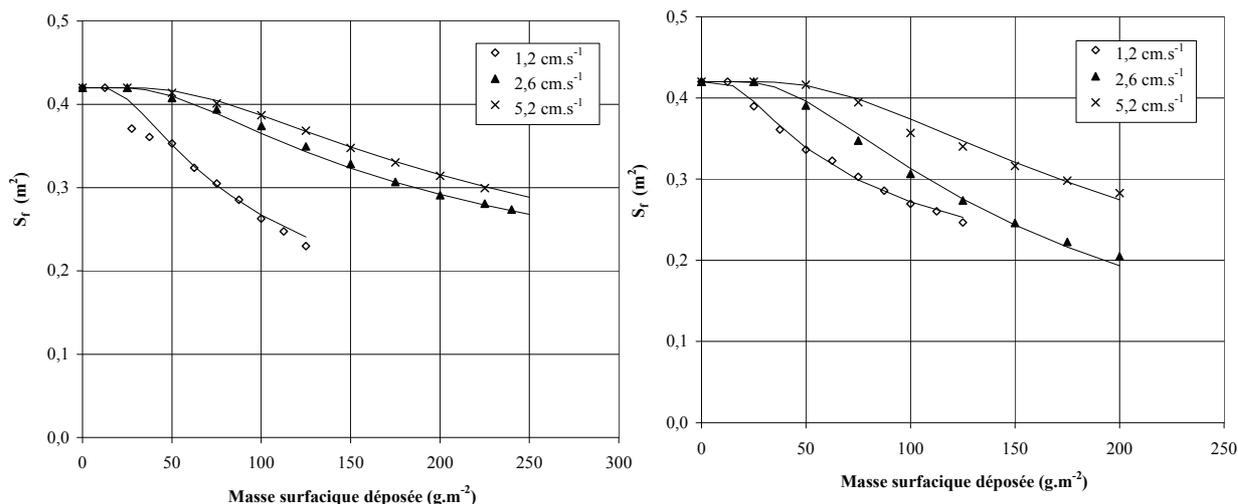


Figure 4-17 : Modèle d'ajustement de l'évolution de la surface de filtration d'un filtre plissé durant son colmatage avec l'aérosol d'alumine à différentes vitesses de filtration et pour deux taux d'humidité relative : à gauche à 5 % et à droite à 95 %

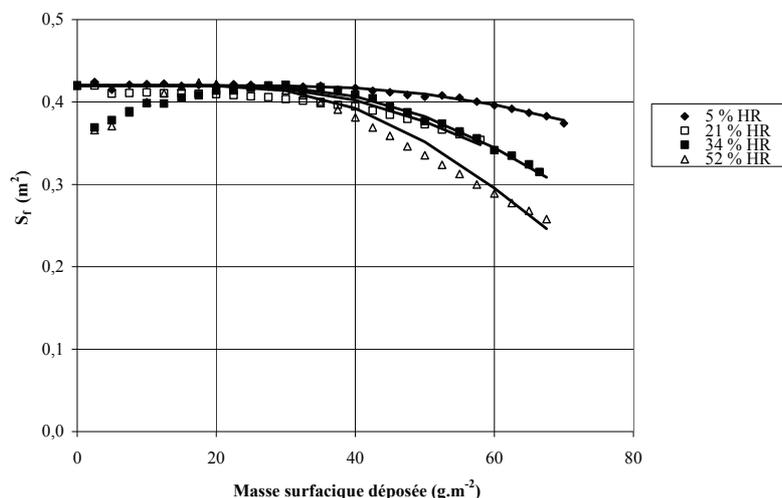


Figure 4-18 : : Modèle d'ajustement de l'évolution de la surface de filtration d'un filtre plissé durant son colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à  $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$  et pour différents taux d'humidité relative

Ces quelques valeurs des coefficients  $c$  et  $d$  ajustées aux résultats expérimentaux permettent de dégager quelques tendances. Concernant le coefficient  $c$ , il semble que sa valeur est peu influencée par la vitesse de filtration, mais qu'elle augmente lorsque l'humidité relative augmente (hormis à  $1,2 \text{ cm.s}^{-1}$  avec l'aérosol d'alumine). Ainsi, cela confirme que la surface de filtration diminue d'autant plus vite que l'humidité relative de l'air est élevée.

Pour un taux d'humidité relative donné, le coefficient  $d$  augmente lorsque la vitesse de filtration augmente ; de plus, pour une vitesse de filtration donnée,  $d$  semble être indépendant du taux d'humidité relative. Ainsi, il semble que la masse surfacique de particules à partir de laquelle la réduction de la surface de filtration devient importante dépende de la vitesse de filtration, mais pas ou peu de l'humidité relative de l'air.

Davantage de valeurs expérimentales seraient nécessaires pour proposer des corrélations empiriques pour calculer les coefficients  $c$  et  $d$  qui dépendent de la vitesse de filtration, de l'humidité relative, du diamètre des particules et peut-être également de leur hygroscopicité. Les résultats semblent indiquer que la baisse significative de la surface de filtration s'amorce pour une masse surfacique de particules plus faible avec l'aérosol de chlorure de sodium qu'avec celui d'alumine. Néanmoins, le manque de données ne permet pas de conclure quant à une influence du diamètre de l'aérosol, de son hygroscopicité ou encore d'une interaction entre les deux.

### Bilan

*Cette partie s'est intéressée à la modélisation des résultats expérimentaux d'évolution de la perte de charge des filtres plissés durant leur colmatage avec les aérosols d'alumine et de chlorure de sodium en présence d'humidité à un taux d'humidité relative inférieur à son point de déliquescence.*

*Les résultats ont révélé que la méthode employée avec les filtres plans de modélisation de la résistance spécifique d'un gâteau de particules sous humidité peut également être utilisée avec les filtres plissés lorsque la réduction de la surface de filtration est négligeable. C'est le cas par exemple en début de colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium pour des taux d'humidité relative inférieurs à 60 % ; dans les autres cas, notamment avec l'aérosol d'alumine, la réduction de la surface de filtration intervient très vite et rend la méthode insuffisante pour décrire l'influence de l'humidité relative de l'air. Ainsi, l'influence de l'humidité relative de l'air doit également être intégrée dans le terme de réduction de la surface de filtration propre aux filtres plissés.*

*Une autre approche de modélisation consiste à exprimer l'évolution de la surface de filtration du filtre durant son colmatage en fonction de la masse surfacique de particules déposées. Celle-ci est évaluée, à partir des données expérimentales acquises, en considérant la relation de Novick (1992) et en exprimant la conservation du débit volumique tout au long du colmatage. La formulation empirique proposée nécessite l'acquisition de données expérimentales complémentaires avant de lui donner un caractère vraiment prédictif.*

### III. CONCLUSION

Ce chapitre s'est intéressé à la modélisation de l'évolution de la perte de charge d'un filtre durant son colmatage en présence d'humidité. L'étude bibliographique a révélé qu'il n'existe à ce jour aucun modèle phénoménologique, qualifié en air sec, d'évolution de la perte de charge d'un filtre plan prenant en compte l'influence couplée de la granulométrie de l'aérosol et de la vitesse de filtration. Pour les filtres plissés, la réduction de la surface de filtration intervenant au cours du colmatage rend la modélisation encore plus délicate à appréhender.

Dans le cas de la filtration en présence d'humidité, des expériences ont mis en évidence que les particules déposées sur le filtre peuvent ne pas être à l'équilibre thermodynamique avec l'air humide puisque la perte de charge du filtre évolue une fois le colmatage achevé ; ainsi, les courbes d'évolution de la perte de charge ne traduisent pas un état d'équilibre du système et dépendent donc des conditions opératoires, dont notamment la durée de filtration.

Les modèles en air sec n'étant pas établis, le travail de modélisation de la perte de charge d'un filtre colmaté en présence d'humidité s'est orienté tout d'abord vers une méthode globale d'estimation de la résistance spécifique d'un gâteau de particules. Le modèle considère que la perte de charge du filtre colmaté est égale à la somme de sa perte de charge initiale et de la perte de charge du gâteau de particules. Le gâteau de particules est ensuite décomposé en N couches successives conduisant chacune à une perte de charge qui dépend de son état d'équilibre avec l'air humide. Cette méthode nécessite de connaître, d'une part l'évolution de la résistance spécifique du gâteau de particules en air sec, d'autre part son évolution en fonction d'une exposition à un flux d'air humide. Ces dernières sont obtenues en exposant un filtre colmaté en air sec à un débit d'air au taux d'humidité relative considéré et à étudier l'évolution de sa perte de charge.

Les résultats ont montré une bonne concordance des valeurs issues de la méthode de modélisation avec les valeurs expérimentales de colmatage des filtres plans par les aérosols d'alumine et de chlorure de sodium pour des taux d'humidité relative inférieurs à son point de déliquescence. Cette approche a également été testée avec les filtres plissés et s'est révélée satisfaisante tant que la réduction de la surface de filtration reste faible.

Cette méthode de modélisation conduit donc à des résultats prometteurs. L'influence de la vitesse de filtration ainsi que du diamètre et de l'hygroscopicité de l'aérosol devrait être étudiée afin de proposer des corrélations empiriques.

Une autre approche de modélisation de la perte de charge d'un filtré plissé colmaté sous humidité a également été appréhendée. Elle consiste à considérer l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé durant son colmatage comme celle d'un filtre plan et à tenir compte de la réduction de la surface de filtration d'après la conservation du débit volumique. Cette approche permet d'exprimer l'évolution expérimentale de la surface de filtration en fonction de la masse surfacique de particules déposées pour chaque colmatage de filtre effectué. Fortes de davantage de résultats expérimentaux, des corrélations empiriques pourraient être proposées exprimant la surface de filtration du filtre durant son colmatage en fonction de la vitesse de filtration, de la granulométrie et de l'hygroscopicité de l'aérosol, de l'humidité relative de l'air et également des paramètres géométriques de plissage du filtre.

Cette approche est néanmoins peu rigoureuse. En effet, tant que le régime d'écoulement à travers le filtre est laminaire, la relation linéaire entre la perte de charge du filtre et la vitesse de filtration peut être appliquée, mais lorsque la surface de filtration devient très faible, il est vraisemblable que le régime d'écoulement à travers les plis restant ouverts ne soit plus laminaire.

Ainsi, si la méthode globale de modélisation de la résistance spécifique d'un gâteau de particules formé en air humide permet de rendre compte de façon satisfaisante de l'évolution de la perte de charge d'un filtre plan ou de celle d'un filtre plissé en début de colmatage, la modélisation de la perte de charge d'un filtre plissé intégrant la phase de réduction de la surface de filtration manque encore de consistance, tant en air sec qu'en air humide.

## CONCLUSION GENERALE

Il existe peu d'études dans la littérature consacrées à l'influence de l'humidité sur des filtres plissés de type industriel. De façon générale en filtration THE, les études concernent le plus souvent des filtres de géométrie plane, utilisés comme filtres de prélèvement dans le cadre de la surveillance de la qualité de l'air, comme par exemple celle de la radioactivité. Ces filtres sont de plus mieux adaptés aux conditions d'essais en laboratoire. En effet, l'importante surface de filtration des filtres industriels nécessite des installations de recherche capables de fournir d'importants débits de filtration qui sont donc plus délicates à mettre en œuvre.

L'objectif de ces travaux était de pallier l'absence de données analytiques sur l'influence de la présence d'humidité durant le colmatage d'un filtre THE à petits plis, en termes d'évolution de sa perte de charge et également de son efficacité.

La démarche de travail adoptée durant ces travaux a consisté à travailler avec les deux géométries plane et plissée de filtres. En effet, l'étude du colmatage des filtres plans dans les mêmes conditions opératoires que les filtres plissés s'est révélée très intéressante pour la caractérisation des gâteaux de particules. L'influence de la présence d'humidité durant le colmatage d'un filtre a donc été étudiée pour les filtres plan et plissé et avec deux types d'aérosols de granulométrie et de nature hygroscopique différentes : un aérosol non-hygroscopique micronique d'alumine et un aérosol hygroscopique submicronique de chlorure de sodium. L'influence de l'humidité relative de l'air sur l'efficacité d'un filtre plissé a également été étudiée.

Une caractérisation des aérosols utilisés pour les colmatages des filtres ainsi que de celui d'urinine, employé pour la mesure de l'efficacité des filtres, a tout d'abord été effectuée. Cette étape était essentielle pour l'interprétation des courbes de colmatage.

L'influence de l'humidité a ensuite été étudiée au niveau des performances initiales des filtres plissés. Ainsi, les résultats ont montré que la perte de charge d'un filtre vierge hydrofugé n'est pas influencée par la présence d'humidité relative entre 5 et 95 %. Concernant l'efficacité des filtres, les résultats ont mis en évidence une diminution du coefficient d'épuration des filtres, mesuré à l'aérosol normalisé d'urinine au minimum d'efficacité, au-delà de 90 % d'humidité relative, attribuable à l'interaction de l'aérosol devenu liquide avec les fibres du medium filtrant.

L'influence de l'humidité a enfin été étudiée au niveau du colmatage des filtres ; les résultats expérimentaux ont révélé qu'elle dépend de plusieurs paramètres. L'hygroscopicité de l'aérosol, conformément aux résultats de Gupta *et al.* (1993), ainsi que la géométrie du filtre en sont les deux premiers :

- avec l'aérosol non-hygroscopique ou l'aérosol hygroscopique en dessous de son point de déliquescence et durant la formation du gâteau de particules tout d'abord, i. e. pour un filtre plan ou un filtre plissé en début de colmatage, les résultats confirment que pour une même masse de particules déposées sur le filtre, sa perte de charge est d'autant plus faible que l'humidité relative de l'air est grande. Cet effet de l'humidité est plus marqué pour l'aérosol hygroscopique. C'est l'augmentation des forces d'adhésion entre les particules en présence d'humidité, avec notamment une adsorption de la vapeur d'eau par les particules, qui est à l'origine de cette influence de l'humidité. Pour un filtre plissé durant la phase de réduction de la surface de filtration, l'effet de l'humidité est inversé. En effet, pour une même masse de particules déposées, la perte de charge du filtre est d'autant plus grande que l'humidité relative de l'air est grande. L'observation de la surface des filtres en fin de colmatage a révélé que la présence d'humidité accélère le processus d'obturation des plis, responsable de l'augmentation de la perte de charge des filtres. En termes d'efficacité, les résultats ont montré que le coefficient d'épuration d'un filtre plissé passe par un maximum en fonction de son niveau de colmatage. Dans un premier temps, le coefficient d'épuration augmente durant la formation du gâteau de particules car ces dernières constituent des collecteurs supplémentaires qui concourent, comme les fibres, à la collecte des particules d'urinine ; lorsque le colmatage du filtre devient important, le coefficient d'épuration diminue à cause de la réduction de la surface de filtration du filtre qui conduit à une augmentation de la vitesse interstitielle de filtration.

Les résultats ont également montré que la valeur de l'efficacité du filtre semble être d'autant plus faible que l'humidité relative de l'air durant le colmatage est grande ;

- avec un aérosol hygroscopique au-dessus de son point de déliquescence, celui-ci se trouve sous forme de gouttelettes et l'évolution du colmatage du filtre (plan ou plissé) est caractéristique d'une filtration de liquide. Ainsi, les résultats ont montré que la perte de charge du filtre augmente de façon exponentielle à partir d'une certaine masse de particules collectées, correspondant à la formation d'un film liquide à sa surface ; la poursuite du colmatage du filtre aurait vraisemblablement permis d'observer la phase de drainage, correspondant à une stabilisation de la perte de charge du filtre. Concernant l'efficacité, celle-ci diminue tout au long du colmatage à cause de la réduction de la quantité de fibres disponibles pour la collecte des particules d'urane. En termes de sûreté, il est intéressant de noter que l'ensemble des valeurs du coefficient d'épuration des filtres testés s'est révélé supérieur à 2000, valeur limite que s'imposent souvent les exploitants des installations nucléaires françaises.

Par ailleurs, des essais ont mis en évidence que les gâteaux de particules formés sous humidité peuvent ne pas être à l'équilibre thermodynamique avec la vapeur d'eau contenue dans l'air. Le troisième paramètre à prendre en compte lors de la filtration en présence d'humidité est donc l'adsorption de la vapeur d'eau par les particules déposées sur le filtre. C'est à partir de cette observation, encore jamais abordée à notre connaissance dans la littérature, que la dernière étape du travail, consacrée à la modélisation de la perte de charge des filtres, a été orientée.

Il est important de souligner que ces travaux ont tout d'abord démontré qu'aucun modèle ne permet de prédire de façon satisfaisante l'évolution de la perte de charge d'un filtre THE à petits plis pour des conditions d'air sec et pour l'ensemble des gammes de paramètres étudiés, notamment en termes de granulométrie des aérosols.

Ainsi, une méthode globale d'estimation de la perte de charge d'un filtre durant son colmatage en présence d'humidité a été proposée. Cette méthode est applicable durant l'étape de filtration en surface, i. e. pendant la constitution d'un gâteau de particules à la surface du filtre sans réduction significative de la surface de filtration, et pour des taux d'humidité relative inférieurs au point de déliquescence de l'aérosol s'il est hygroscopique. Elle nécessite de connaître, d'une part l'évolution de la résistance spécifique du gâteau de particules en air sec, d'autre part son évolution en fonction d'une exposition à un flux d'air humide.

Les résultats ont montré une bonne concordance des valeurs issues de la méthode de modélisation avec les valeurs expérimentales de colmatage des filtres plans par les aérosols d'alumine et de chlorure de sodium pour des taux d'humidité relative inférieurs à son point de déliquescence. L'influence de la durée de filtration a notamment été mise en évidence sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre, en particulier avec un aérosol hygroscopique. Cette approche a également été testée avec les filtres plissés et s'est révélée satisfaisante tant que la réduction de la surface de filtration est négligeable, ce qui reste le cas dans les installations nucléaires en conditions normales de fonctionnement puisque les filtres sont souvent changés avant d'atteindre une perte de charge de 100 daPa, soit a priori avant d'atteindre la phase de réduction significative de la surface de filtration.

Les pistes de travail à envisager concernent tout d'abord l'interaction entre la vapeur d'eau et les particules. En effet, afin de développer un modèle le plus prédictif possible de l'évolution de la perte de charge d'un filtre en présence d'humidité, il faut être capable de modéliser l'adsorption de la vapeur d'eau par les particules formant le gâteau. Pour cela, il serait intéressant de pouvoir corréler l'évolution de la perte de charge des filtres avec les isothermes d'adsorption de la vapeur d'eau par les particules, et en particulier à travers la notion de cinétique d'adsorption. L'influence de la vitesse de filtration sur l'adsorption, qui n'a pas pu être étudiée faute de temps et qui introduit un facteur dynamique par rapport aux méthodes classiques de détermination des isothermes d'adsorption, devrait également être prise en compte sur la base d'essais à mener sur différents aérosols hygroscopiques.

La méthode globale de modélisation développée peut également être appliquée aux filtres plissés en intégrant un terme de réduction de la surface de filtration. Ce terme dépend de nombreux paramètres tels que la nature hygroscopique et la granulométrie de l'aérosol, la vitesse de filtration et évidemment l'humidité relative de l'air. Même si ces travaux se sont centrés exclusivement sur les filtres à petits plis utilisés dans l'industrie nucléaire française, il serait intéressant d'intégrer également les caractéristiques géométriques de plissage du filtre comme paramètre d'étude.

Néanmoins, vouloir modéliser l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé en présence d'humidité semble un peu prématuré dans la mesure où les modèles existants ne permettent pas encore de couvrir l'ensemble des conditions opératoires en air sec, notamment le couplage de l'influence de la vitesse de filtration avec la granulométrie de l'aérosol. A cet égard, il semblerait judicieux d'intégrer dans les rares modèles existants ou dans ceux à développer, outre le nombre de Reynolds caractéristique de l'écoulement dans le pli, un paramètre tel que le nombre de Stokes, susceptible de rendre compte de ce couplage. Il y a en fait un réel besoin d'alimenter les bases de données expérimentales avec davantage de résultats, tout d'abord en conditions d'air sec ou à humidité modérée, afin d'affiner les modèles existants. Pour cela, il est nécessaire d'avoir la meilleure connaissance possible du dépôt des particules le long des plis. Des recherches devront être menées dans ce sens ; l'utilisation d'aérosols radioactifs est d'ailleurs à l'étude. Cependant, il sera toujours très difficile, voire impossible pour un modèle, de rendre compte d'un phénomène aussi complexe que le collage des plis obtenu avant la déliquescence de l'aérosol hygroscopique de chlorure de sodium ; il serait d'ailleurs intéressant de confirmer l'existence d'un tel phénomène avec un autre aérosol hygroscopique.

Concernant la modélisation prédictive de l'efficacité des filtres THE, les résultats expérimentaux ont révélé que les modèles existants ne permettent pas d'estimer quantitativement même en air sec l'efficacité initiale des filtres utilisés dans l'industrie nucléaire. En effet, la grande polydispersion des fibres constituant les media filtrants actuels rend difficile l'utilisation des modèles très sensibles au couple « diamètre moyen, écart-type » des fibres. Il est donc nécessaire d'améliorer ces modèles dans un premier temps avant d'y intégrer l'influence du paramètre humidité. A cet égard, des premières simulations, réalisées sur des media filtrants plans avec un outil de mécanique des fluides multidimensionnel dédié à la filtration, semblent encourageantes (Geryes, 2009), même si un grand travail de validation reste encore à réaliser. Quant à l'évolution de l'efficacité durant le colmatage d'un filtre plissé, celle-ci est vraisemblablement étroitement liée, d'une part à l'évolution des caractéristiques du gâteau se formant le long des plis, d'autre part aux conditions d'écoulement du fluide au niveau des plis ; son développement est donc à envisager parallèlement à celui des modèles d'évolution de la perte de charge des filtres plissés.

Pour conclure, ces travaux ont permis de mettre en évidence l'influence de l'humidité sur le colmatage d'un filtre THE à petits plis en présence d'humidité ; les résultats expérimentaux obtenus montrant que les acquis en termes d'évolution de la perte de charge des filtres plans ne sont pas directement extrapolables aux filtres plissés, associés aux résultats expérimentaux relatifs à leur efficacité, constituent une première base de données expérimentale en termes de sûreté nucléaire. L'importance pendant le colmatage de l'équilibre thermodynamique entre les particules déposées et la vapeur d'eau contenue dans l'air a également été abordée durant ces travaux, et ce pour la première fois dans le domaine de la filtration sous humidité. Concernant la modélisation des résultats, de nombreux travaux restent néanmoins à mener avant d'être en mesure de développer un modèle prédictif de l'évolution de la perte de charge et de l'efficacité d'un filtre plissé durant son colmatage en présence d'humidité, cela passant par l'amélioration des modèles en air sec et de leurs limites.

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1-1 : Eléments composant un filtre THE</i> .....	3
<i>Figure 1-2 : Exemple d'une demi-cellule (composée de deux dièdres) utilisée dans les installations nucléaires françaises</i> .....	4
<i>Figure 1-3 : Schématisation de la hauteur et du pas d'un pli (Del Fabbro, 2001)</i> .....	4
<i>Figure 1-4 : Schématisation du mécanisme de collecte par diffusion brownienne (Del Fabbro, 2001)</i> .....	10
<i>Figure 1-5 : Schématisation du mécanisme de collecte par interception (Del Fabbro, 2001)</i> .....	12
<i>Figure 1-6 : Schématisation du mécanisme de collecte par impaction inertielle (Del Fabbro, 2001)</i> .....	13
<i>Figure 1-7 : Efficacités globale et unitaires d'un filtre vierge THE calculées selon le modèle théorique de Gougeon (1994)</i> .....	14
<i>Figure 1-8 : Condensation capillaire entre deux particules sphériques de surface lisse (Butt and Kappl, 2009)</i> .....	16
<i>Figure 1-9 : Schématisation de deux particules rugueuses en contact à différentes pressions de vapeur (Butt and Kappl, 2009)</i> .....	16
<i>Figure 1-10 : Etude de la force de capillarité entre deux particules rugueuses de 10 µm en fonction de la taille des aspérités ; à gauche influence de la distance entre les particules, à droite influence de l'humidité relative (Butt and Kappl, 2009)</i> .....	17
<i>Figure 1-11 : Evolution de la perte de charge et de la perméance d'un filtre THE plan durant son colmatage par un aérosol solide (Pénicot-Bauge, 1998)</i> .....	19
<i>Figure 1-12 : Colmatage en trois phases d'un filtre THE plissé par un aérosol solide (Del Fabbro, 2001)</i> .....	19
<i>Figure 1-13 : Colmatage d'une fibre par un aérosol solide submicronique (Thomas, 2001)</i> .....	20
<i>Figure 1-14 : Colmatage d'une fibre par un aérosol solide micronique (Thomas, 2001)</i> .....	20
<i>Figure 1-15 : Deux configurations de dépôt de particules solides microniques dans un filtre THE, selon la vitesse de filtration (Del Fabbro, 2001)</i> .....	22
<i>Figure 1-16 : Réduction de la surface de filtration engendrée par le dépôt de particules sur le medium filtrant, le long de la hauteur d'un pli (Del Fabbro, 2001)</i> .....	26
<i>Figure 1-17 : Comportement schématique d'un aérosol liquide filtré (Raynor et Leith, 2000)</i> .....	28
<i>Figure 1-18 : Les différents aspects du dépôt d'un aérosol liquide sur les fibres selon la compacité du medium (Pénicot-Bauge, 1998)</i> .....	29
<i>Figure 1-19 : Schématisation de l'étalement d'une goutte</i> .....	29
<i>Figure 1-20 : Evolutions de la perméance et de la perte de charge d'un filtre THE plan au cours de son colmatage par un aérosol liquide (Contal et al., 2004)</i> .....	30
<i>Figure 1-21 : Evolution de la viscosité dynamique et de la masse volumique de l'air en fonction de la température et de l'humidité relative (Tsilingiris, 2008)</i> .....	34
<i>Figure 1-22 : Variation de l'enthalpie libre en fonction du rayon de la particule (Seinfeld, 1986)</i> .....	37
<i>Figure 1-23 : Courbe de Köhler pour une solution de gouttes formées à partir d'un noyau de condensation de sulfate d'ammonium de 10<sup>-16</sup>g</i> .....	38
<i>Figure 1-24 : Isotherme d'adsorption de l'eau par des cristaux de NaCl à une température de -12 °C (Foster et Ewing, 1999)</i> .....	41
<i>Figure 1-25 : Modèle de croissance par couches adsorbées de l'eau à la surface du NaCl (Foster et Ewing, 1999)</i> .....	42
<i>Figure 1-26 : Déliquescence de particules de NaCl à une température de 5 °C. (a) particule solide à 70 % HR, (b) premier changement détectable de morphologie due à une adsorption d'eau à 75 % HR, (c) présence d'un mince film liquide à la surface de toutes les particules à 76,7 %, (d) formation de gouttelette à HR de 78,3 % (Ebert et al., 2002)</i> .....	42
<i>Figure 1-27 : Simulation de l'influence des forces d'adhésion entre les particules sur la morphologie du gâteau de particules (Jeon et Jung, 2004)</i> .....	47
<i>Figure 1-28 : Schématisation de l'influence de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre THE plan en fonction de la masse surfacique de particules collectées pour un aérosol non-hygroscopique ou un aérosol hygroscopique en dessous de son point de déliquescence</i> .....	48
<i>Figure 1-29 : Schématisation de l'évolution de la perte de charge d'un filtre THE en fonction de la masse surfacique de gouttelettes collectées d'un aérosol hygroscopique pour une humidité au-dessus de son point de déliquescence</i> .....	49

---

<i>Figure 1–30 : Influence de l'humidité relative sur l'accroissement de la perte de charge d'un medium filtrant plan pré-colmaté à l'aérosol atmosphérique, à <math>T=25\text{ °C}</math> et <math>U_j=2,5\text{ cm.s}^{-1}</math> (Ricketts et al., 1991)</i>	50
<i>Figure 2–1 : Schéma de principe du banc d'essais CATFISH (Artous, 2005)</i>	55
<i>Figure 2–2 : Principe de fonctionnement du sécheur frigorifique</i>	56
<i>Figure 2–3 : Schéma de l'humidificateur</i>	57
<i>Figure 2–4 : Schéma de principe d'un débitmètre à ultrasons</i>	58
<i>Figure 2–5 : Chaîne de mesure-contrôle du procédé (Artous, 2005)</i>	59
<i>Figure 2–6 : Agrandissement au MEB (<math>\times 2700</math>) de la poudre d'alumine utilisée</i>	60
<i>Figure 2–7 : Agrandissement au MEB (<math>\times 5000</math>) d'un dépôt de particules de chlorure de sodium à la surface d'un filtre plan</i>	60
<i>Figure 2–8 : Générateur par dispersion de poudre PALAS BEG-1000</i>	62
<i>Figure 2–9 : Schéma de principe (à gauche) et photographie (à droite) du générateur pneumatique</i>	63
<i>Figure 2–10 : Schéma de principe (à gauche) et photographie (à droite) de l'APS</i>	64
<i>Figure 2–11 : Schéma de principe (à gauche) et photographie (à droite) du SMPS</i>	65
<i>Figure 2–12 : Photographie du néphélomètre</i>	65
<i>Figure 2–13 : Description de la méthode employée pour la détermination du facteur de forme dynamique des particules d'alumine</i>	67
<i>Figure 2–14 : Etude de l'évolution de la masse de poudre d'alumine dans le générateur</i>	69
<i>Figure 2–15 : Etude de la stabilité du débit généré d'aérosol d'alumine avec le néphélomètre</i>	69
<i>Figure 2–16 : Etude de la stabilité du débit généré d'aérosol de chlorure de sodium avec le SMPS</i>	70
<i>Figure 2–17 : Evolution du facteur de croissance de l'aérosol d'alumine en fonction de l'humidité relative de l'air</i>	72
<i>Figure 2–18 : Evolution du facteur de croissance de l'aérosol de chlorure de sodium en fonction de l'humidité relative de l'air</i>	73
<i>Figure 2–19 : Agrandissement au MET des particules de chlorure de sodium prélevées en air sec</i>	74
<i>Figure 2–20 : Evolution du facteur de croissance de l'aérosol d'uranine en fonction de l'humidité relative de l'air</i>	76
<i>Figure 2–21 : Photographie d'un filtre THE plan (à gauche) et d'un filtre THE plissé (à droite) étudiés durant ces travaux</i>	77
<i>Figure 2–22 : Agrandissement au MEB de la surface d'un filtre plan</i>	78
<i>Figure 2–23 : Evolution de la perte de charge à travers les filtres plans vierges en fonction de la vitesse de filtration</i>	79
<i>Figure 2–24 : Comparaison des modèles de prédiction de la perte de charge d'un filtre à petits plis vierge avec des valeurs expérimentales, en fonction de la vitesse de filtration</i>	80
<i>Figure 2–25 : Influence de la géométrie plane ou plissée du filtre THE vierge sur l'évolution de sa perte de charge en fonction de la vitesse de filtration</i>	80
<i>Figure 2–26 : Influence de la vitesse de filtration sur le coefficient d'épuration de filtres THE vierges à petits plis (comparaison modèle – expérience)</i>	81
<i>Figure 2–27 : Synthèse des rapports entre la perte de charge des filtres plissés vierges étudiés et la vitesse de filtration, en régime d'écoulement laminaire</i>	82
<i>Figure 2–28 : Protocole expérimental</i>	83
<i>Figure 3–1 : Evolution de la perte de charge d'un filtre plissé vierge soumis à des paliers d'humidité</i>	88
<i>Figure 3–2 : Influence de l'humidité relative de l'air sur le coefficient d'épuration, mesuré à l'uranine et à la vitesse nominale de filtration, de filtres THE à petits plis vierges</i>	89
<i>Figure 3–3 : Evolution de la perte de charge d'un filtre THE plan en fonction de la masse surfacique de particules d'alumine collectées à différents taux d'humidité relative et à une vitesse de filtration de <math>4,0\text{ cm.s}^{-1}</math></i>	91
<i>Figure 3–4 : Evolution de la perte de charge d'un filtre THE plan en fonction de la masse surfacique de particules de chlorure de sodium collectées à différents taux d'humidité relative en dessous du point de déliquescence et à une vitesse de filtration de <math>7,0\text{ cm.s}^{-1}</math></i>	92
<i>Figure 3–5 : Evolution de la perte de charge d'un filtre THE plan en fonction de la masse surfacique de particules de chlorure de sodium collectées à deux différents taux d'humidité relative au-dessus du point de déliquescence et à une vitesse de filtration de <math>7,0\text{ cm.s}^{-1}</math></i>	92
<i>Figure 3–6 : Evolution de la résistance spécifique d'un gâteau formé de particules non-hygroscopiques d'alumine en fonction de l'humidité relative du colmatage et pour différents diamètres de particules</i>	93

---

Figure 3-7 : Evolution de la résistance spécifique d'un gâteau formé de particules hygroscopiques de chlorure de sodium en fonction de l'humidité relative du colmatage et pour différents diamètres de particules .....	93
Figure 3-8 : Influence de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge de filtres à petits plis colmatés par l'aérosol non-hygroscopique d'alumine de taille micronique à une vitesse de filtration de $2,6 \text{ cm.s}^{-1}$ .....	95
Figure 3-9 : Influence de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge de filtres à petits plis colmatés par l'aérosol non-hygroscopique d'alumine de taille micronique pour deux vitesses de filtration : à gauche $1,2 \text{ cm.s}^{-1}$ et à droite $5,0 \text{ cm.s}^{-1}$ .....	95
Figure 3-10 : Influence de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge de filtres à petits plis colmatés par l'aérosol hygroscopique submicronique de chlorure de sodium à une vitesse de filtration de $2,7 \text{ cm.s}^{-1}$ .....	96
Figure 3-11 : Influence de l'humidité sur l'évolution de la perte de charge de filtres à petits plis colmatés par l'aérosol hygroscopique submicronique de chlorure de sodium à une vitesse de filtration de $6,9 \text{ cm.s}^{-1}$ .....	97
Figure 3-12 : Influence de la vitesse de filtration sur l'évolution de la perte de charge de filtres plans colmatés par l'aérosol micronique d'alumine pour deux différents taux d'humidité relative : à gauche $HR < 10 \%$ et à droite $HR = 92 \%$ .....	98
Figure 3-13 : Influence de la vitesse de filtration sur l'évolution de la perte de charge de filtres à petits plis colmatés par l'aérosol micronique d'alumine pour deux différents taux d'humidité relative : à gauche $HR < 10 \%$ et à droite $HR = 95 \%$ .....	98
Figure 3-14 : Influence de la vitesse de filtration sur l'évolution de la perte de charge de filtres à petits plis colmatés par l'aérosol submicronique de chlorure de sodium pour deux différents taux d'humidité relative : à gauche $HR = 5 \%$ et à droite $HR \approx 20 \%$ .....	99
Figure 3-15 : Influence de la géométrie plane ou plissée d'un filtre sur l'évolution de sa perte de charge durant son colmatage avec l'aérosol micronique d'alumine pour trois taux d'humidité relative : $5-25 \%$ , $94-95 \%$ et $100 \%$ .....	100
Figure 3-16 : Influence de la géométrie plane ou plissée d'un filtre sur l'évolution de sa perte de charge durant son colmatage avec l'aérosol submicronique de chlorure de sodium pour quatre taux d'humidité relative : $5-10 \%$ , $34-35 \%$ , $45-52 \%$ et $60 \%$ .....	101
Figure 3-17 : Comparaison des masses surfaciques limites de particules déposées sur les filtres plissés en fonction de l'humidité relative du colmatage pour les aérosols d'alumine et de chlorure de sodium .....	102
Figure 3-18 : Rapport entre la masse d'eau adsorbée sur le filtre et la masse d'aérosol collecté en fonction de l'humidité relative (à gauche) et du rapport de mélange (à droite) durant les colmatages sur filtres plans et plissés par l'aérosol non-hygroscopique d'alumine .....	103
Figure 3-19 : Rapport entre la masse d'eau adsorbée sur le filtre et la masse d'aérosol collecté en fonction de l'humidité relative (à gauche) et du rapport de mélange (à droite) durant les colmatages de filtres plissés par l'aérosol hygroscopique de chlorure de sodium .....	103
Figure 3-20 : Rapport entre la masse d'eau adsorbée sur le filtre et la masse d'aérosol collecté en fonction de l'humidité relative entre $5$ et $70 \%$ (à gauche) et du rapport de mélange entre $1$ et $14 \text{ g.kg}_{\text{as}}^{-1}$ (à droite) durant les colmatages de filtres plissés par l'aérosol hygroscopique de chlorure de sodium .....	104
Figure 3-21 : Evolutions du rapport de mélange en aval du filtre normé avec celui en amont du filtre en fonction de la masse surfacique de particules déposées d'alumine (à gauche) et de chlorure de sodium (à droite), pour différents taux d'humidité relative .....	104
Figure 3-22 : Photographies au MEB du dépôt de particules à la surface de filtres THE plans colmatés en air sec : à gauche avec de l'alumine ( $200 \text{ g.m}^{-2}$ ) et à droite avec du chlorure de sodium ( $23 \text{ g.m}^{-2}$ ) .....	106
Figure 3-23 : Photographies au MEB du dépôt de particules de chlorure de sodium en profondeur pour deux filtres colmatés à deux taux d'humidité relative différents : à gauche à $5 \%$ et à droite à $45 \%$ .....	107
Figure 3-24 : Photographies au MEB du dépôt de particules d'alumine en surface de deux filtres colmatés à deux taux d'humidité relative différents : à gauche à $5 \%$ ( $200 \text{ g.m}^{-2}$ ) et à droite à $100 \%$ ( $200 \text{ g.m}^{-2}$ ) .....	107
Figure 3-25 : Photographies au MEB du dépôt en surface de particules de chlorure de sodium de filtres colmatés à différents taux d'humidité relative : en haut à gauche à $5 \%$ ( $23 \text{ g.m}^{-2}$ ), en haut à droite à $45 \%$ ( $23 \text{ g.m}^{-2}$ ) et en bas à $60 \%$ ( $18 \text{ g.m}^{-2}$ ) .....	108
Figure 3-26 : Représentation par méthode interférométrique de l'épaisseur d'un gâteau de particules d'alumine .....	109
Figure 3-27 : Photographies d'une partie de la surface de deux filtres plissés après un colmatage à $2,6 \text{ cm.s}^{-1}$ , à $5 \%$ d'humidité relative et à deux masses surfaciques de particules d'alumine déposées différentes : à gauche de $95 \text{ g.m}^{-2}$ et à droite de $240 \text{ g.m}^{-2}$ .....	112
Figure 3-28 : Photographies de la surface de deux filtres plissés après un colmatage jusqu'à $240 \text{ g.m}^{-2}$ de particules d'alumine, à $5 \%$ d'humidité relative et à deux vitesses de filtration : à gauche de $1,2 \text{ cm.s}^{-1}$ et à droite de $2,6 \text{ cm.s}^{-1}$ .....	113

<i>Figure 3–29 : Photographies d'une partie de la surface de deux filtres plissés après un colmatage à <math>2,6 \text{ cm.s}^{-1}</math>, jusqu'à environ <math>100 \text{ g.m}^{-2}</math> de particules d'alumine et à deux taux d'humidité relative de l'air différents : à gauche de 5 % et à droite 100 %</i>	113
<i>Figure 3–30 : Photographies d'une partie de la surface de deux filtres plissés après un colmatage à <math>2,7 \text{ cm.s}^{-1}</math> et 5 % d'humidité relative avec deux aérosols différents : à gauche chlorure de sodium jusqu'à <math>70 \text{ g.m}^{-2}</math> et à droite alumine jusqu'à <math>95 \text{ g.m}^{-2}</math></i>	114
<i>Figure 3–31 : Photographies d'une partie de la surface de deux filtres plissés après un colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium effectué à <math>2,7 \text{ cm.s}^{-1}</math> jusqu'à environ <math>70 \text{ g.m}^{-2}</math> et pour deux taux d'humidité relative différents : à gauche 5 % et à droite 50 %</i>	115
<i>Figure 3–32 : Photographies de la surface (à gauche) et d'une partie de cette surface (à droite) d'un filtre plissé après un colmatage avec un aérosol de chlorure de sodium à <math>2,7 \text{ cm.s}^{-1}</math> jusqu'à environ <math>57 \text{ g.m}^{-2}</math> et à un taux d'humidité relative de 70 %</i>	115
<i>Figure 3–33 : Photographie d'une partie de la surface d'un filtre plissé après un colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium effectué à <math>2,7 \text{ cm.s}^{-1}</math> jusqu'à environ <math>110 \text{ g.m}^{-2}</math> et à un taux d'humidité relative de 79 % (supérieur au point de déliquescence des particules)</i>	116
<i>Figure 3–34 : Evolutions comparatives du coefficient d'épuration et de la perte de charge d'un filtre plissé durant son colmatage avec un aérosol non-hygroscopique d'alumine pour différents taux d'humidité relative</i>	117
<i>Figure 3–35 : Photographie de la surface frontale d'un filtre plissé après son colmatage à 95 % d'humidité relative et à <math>2,7 \text{ cm.s}^{-1}</math> par l'aérosol d'alumine</i>	118
<i>Figure 3–36 : Evolutions comparatives du coefficient d'épuration et de la perte de charge d'un filtre plissé durant son colmatage avec l'aérosol hygroscopique de chlorure de sodium pour différents taux d'humidité relative</i>	119
<i>Figure 3–37 : Synthèse des évolutions des coefficients d'épuration des filtres plissés colmatés à différents taux d'humidité relative et différents degrés de colmatage par les aérosols d'alumine et de chlorure de sodium</i>	120
<i>Figure 3–38 : Evolution de la perte de charge de deux filtres plissés pendant et après leur colmatage jusqu'à <math>15 \text{ g.m}^{-2}</math> avec l'aérosol de chlorure de sodium à deux taux d'humidité relative différents de 5 et 46 %</i>	122
<i>Figure 3–39 : Evolution de la perte de charge d'un filtre plissé pendant et après son colmatage jusqu'à <math>96 \text{ g.m}^{-2}</math> avec l'aérosol d'alumine à 100 % d'humidité relative</i>	122
<i>Figure 3–40 : Evolutions de l'humidité relative de l'air et de la perte de charge d'un filtre plan pendant son colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à 5 % d'HR, puis après un pic à 55 % d'HR</i>	123
<i>Figure 3–41 : Evolutions de l'humidité relative de l'air et de la perte de charge d'un filtre plan pendant son colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à 5 % d'HR, puis après un pic à 75 % d'HR</i>	124
<i>Figure 3–42 : Evolutions de l'humidité relative de l'air et de la perte de charge d'un filtre plan pendant son colmatage avec l'aérosol d'alumine à 5 % d'HR, puis après le maintien du débit d'air à 95 % d'HR</i>	124
<i>Figure 3–43 : Evolutions de l'humidité relative de l'air et de la perte de charge d'un filtre plissé pendant son colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à 50 % d'HR, puis après maintien d'un débit d'air à 5 % d'HR</i>	125
<i>Figure 3–44 : Evolutions de l'humidité relative de l'air et de la perte de charge d'un filtre plissé pendant son colmatage avec l'aérosol d'alumine à 100 % d'HR, puis après maintien d'un débit d'air à 15 % d'HR</i>	126
<i>Figure 4–1 : Evolution temporelle de la résistance spécifique de gâteaux de particules d'alumine formés en air sec durant leur exposition à un débit d'air (<math>7,0 \text{ cm.s}^{-1}</math>) à différents taux d'humidité relative</i>	129
<i>Figure 4–2 : Evolution temporelle de la résistance spécifique de gâteaux de particules de chlorure de sodium formés en air sec durant leur exposition à un débit d'air (<math>7,0 \text{ cm.s}^{-1}</math>) à différents taux d'humidité relative</i>	129
<i>Figure 4–3 : Evolution des valeurs à l'équilibre des résistances spécifiques des gâteaux de particules de chlorure de sodium en fonction de l'humidité relative de l'air</i>	130
<i>Figure 4–4 : Influence de la masse de particules déposées sur le filtre (<math>14</math> et <math>30 \text{ g.m}^{-2}</math>) sur l'évolution de la résistance spécifique de gâteaux de particules de chlorure de sodium exposés à un flux d'air humide à 53 et 55 % d'HR</i>	131
<i>Figure 4–5 : Influence de l'humidité relative de l'air (46,5 et 57 % d'HR) sur l'évolution de la résistance spécifique de gâteaux constitués de la même masse de particules de chlorure de sodium (<math>30 \text{ g.m}^{-2}</math>)</i>	131
<i>Figure 4–6 : Evolutions temporelles et courbes d'ajustement des résistances spécifiques des gâteaux de particules exposés à des débits d'air à différents taux d'humidité relative : à gauche d'alumine et à droite de chlorure de sodium</i>	134
<i>Figure 4–7 : Comparaison entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales de la perte de charge d'un filtre durant son colmatage avec l'aérosol d'alumine à différents taux d'humidité relative</i>	135

---

<i>Figure 4–8 : Comparaison entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales de la perte de charge d'un filtre durant son colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à différents taux d'humidité relative inférieurs au point de déliquescence .....</i>	<i>135</i>
<i>Figure 4–9 : Résistances spécifiques expérimentales et calculées pour un gâteau de particules de chlorure de sodium en fonction de l'humidité relative du colmatage.....</i>	<i>136</i>
<i>Figure 4–10 : Influence de la durée de filtration sur l'évolution de la perte de charge d'un filtre plan colmaté à 39 % d'humidité relative avec l'aérosol de chlorure de sodium et calculée à partir du modèle.....</i>	<i>137</i>
<i>Figure 4–11 : Comparaison de l'évolution de la perte de charge calculée et expérimentale d'un filtre à petits plis durant son colmatage en air sec avec l'aérosol micronique d'alumine à différentes vitesses de filtration .</i>	<i>138</i>
<i>Figure 4–12 : Comparaison de l'évolution de la perte de charge calculée et expérimentale d'un filtre à petits plis durant son colmatage en air sec avec l'aérosol submicronique de chlorure de sodium à différentes vitesses de filtration.....</i>	<i>139</i>
<i>Figure 4–13 : Comparaison de l'évolution de la perte de charge calculée et expérimentale d'un filtre à petits plis durant son colmatage avec l'aérosol d'alumine à la vitesse nominale de filtration (<math>2,6 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}</math>) et à différents taux d'humidité relative .....</i>	<i>140</i>
<i>Figure 4–14 : Comparaison de l'évolution de la perte de charge calculée et expérimentale d'un filtre à petits plis durant son colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à la vitesse nominale de filtration (<math>2,7 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}</math>) et à différents taux d'humidité relative inférieurs au point de déliquescence.....</i>	<i>140</i>
<i>Figure 4–15 : Evolution calculée de la surface de filtration d'un filtre plissé durant son colmatage avec l'aérosol d'alumine à différents taux d'humidité relative et différentes vitesses de filtration : en haut à gauche <math>1,2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}</math>, en haut à droite <math>2,6 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}</math> et en bas entre <math>5,0</math> et <math>5,2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}</math>.....</i>	<i>142</i>
<i>Figure 4–16 : Evolution calculée de la surface de filtration d'un filtre plissé durant son colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à différents taux d'humidité relative et à <math>2,7 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}</math> .....</i>	<i>143</i>
<i>Figure 4–17 : Modèle d'ajustement de l'évolution de la surface de filtration d'un filtre plissé durant son colmatage avec l'aérosol d'alumine à différentes vitesses de filtration et pour deux taux d'humidité relative : à gauche à 5 % et à droite à 95 % .....</i>	<i>144</i>
<i>Figure 4–18 : : Modèle d'ajustement de l'évolution de la surface de filtration d'un filtre plissé durant son colmatage avec l'aérosol de chlorure de sodium à <math>2,7 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}</math> et pour différents taux d'humidité relative.....</i>	<i>144</i>

---

## LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1-1 : Normes utilisées dans le secteur nucléaire français pour la mesure de l'efficacité de filtres THE..</i>	5
<i>Tableau 1-2 : Classification NF EN 1822 des filtres HEPA (Bouilloux, 2006) .....</i>	5
<i>Tableau 1-3 : Valeurs expérimentales des constantes A, B et C pour le calcul du facteur de Cunningham selon Kim et al. (2005) .....</i>	11
<i>Tableau 1-4 : Régime d'écoulement en fonction du nombre de Reynolds de particules .....</i>	11
<i>Tableau 1-5 : Influence de divers paramètres intrinsèques à l'aérosol, au filtre et à la filtration, sur l'efficacité de capture par diffusion, interception et impaction inertielle (Thomas, 2001).....</i>	13
<i>Tableau 1-6 : Temps de croissance d'une goutte formée par nucléation sur une particule de NaCl (Rogers et Yau, 1989).....</i>	44
<i>Tableau 1-7 : Tests de rupture mécanique de filtres THE sous humidité (Smith et al., 1993) .....</i>	50
<i>Tableau 1-8 : Evolution de la perte de charge (<math>\Delta P</math>), de la résistance mécanique (<math>R_m</math>) et de l'efficacité (CE) d'un filtre THE plissé vierge hydrofugé soumis à un air humide, saturé ou sursaturé.....</i>	53
<i>Tableau 1-9 : Influence de l'humidité de l'air sur la perte de charge (<math>\Delta P</math>) et la résistance mécanique (<math>R_m</math>) d'un filtre plissé pré-colmaté à l'aérosol atmosphérique.....</i>	53
<i>Tableau 1-10 : Influence de la nature de l'aérosol de colmatage et de l'humidité de l'air sur l'évolution de la perte de charge (<math>\Delta P</math>) d'un filtre plan THE hydrofugé .....</i>	53
<i>Tableau 2-1 : Données fournisseur (AGP) de la composition chimique de la poudre d'alumine utilisée (%).....</i>	60
<i>Tableau 2-2 : Grandeurs caractéristiques des distributions granulométriques des aérosols étudiés en air sec .</i>	68
<i>Tableau 2-3 : Etude de la stabilité du diamètre de l'aérosol de chlorure de sodium dans le temps.....</i>	70
<i>Tableau 2-4 : Qualification de la ligne de prélèvement de l'APS sous humidité .....</i>	70
<i>Tableau 2-5 : Qualification de la ligne de prélèvement du SMPS sous humidité.....</i>	71
<i>Tableau 2-6 : Caractérisation granulométrique de l'aérosol d'alumine sous humidité .....</i>	71
<i>Tableau 2-7 : Caractérisation granulométrique de l'aérosol de chlorure de sodium sous humidité.....</i>	73
<i>Tableau 2-8 : Détermination de la masse volumique des particules de chlorure de sodium après leur déliquescence.....</i>	75
<i>Tableau 2-9 : Caractérisation granulométrique de l'aérosol d'uranine sous humidité.....</i>	75
<i>Tableau 2-10 : Grandeurs caractéristiques des filtres testés .....</i>	77
<i>Tableau 2-11 : Principales caractéristiques physiques du medium filtrant testé.....</i>	78
<i>Tableau 2-12 : Détermination du régime d'écoulement à travers le filtre plan en fonction de la vitesse de filtration .....</i>	79
<i>Tableau 2-13 : Caractérisation aéraulique du medium filtrant vierge .....</i>	79
<i>Tableau 2-14 : Gamme d'étude pour la vitesse de filtration, la température et l'humidité relative de l'air, lors des essais de colmatage .....</i>	84
<i>Tableau 2-15 : Durées caractéristiques des colmatages.....</i>	84
<i>Tableau 3-1 : Transfert de masse durant l'exposition d'un filtre vierge à un débit d'air humide .....</i>	88
<i>Tableau 3-2 : Epaisseurs des gâteaux de particules d'alumine et de chlorure de sodium mesurées par interférométrie et compacités associées calculées.....</i>	110
<i>Tableau 3-3 : Comparaison des résistances spécifiques expérimentales et théoriques des gâteaux de particules d'alumine à différents taux d'humidité relative.....</i>	111
<i>Tableau 3-4 : Comparaison des résistances spécifiques expérimentales et théoriques des gâteaux de particules de chlorure de sodium à différents taux d'humidité relative.....</i>	111
<i>Tableau 3-5 : Influence de la nature hygroscopique de l'aérosol sur l'évolution de la perte de charge (<math>\Delta P</math>), sur l'influence de la vitesse de filtration (<math>U_f</math>) et sur le coefficient d'épuration (CE) d'un filtre THE à petit plis durant son colmatage sous humidité .....</i>	127
<i>Tableau 4-1 : Coefficients d'ajustement a et b pour les particules d'alumine et de chlorure de sodium en fonction de l'humidité relative .....</i>	134
<i>Tableau 4-2 : Coefficients d'ajustement de l'évolution de la surface de filtration d'un filtre plissé colmaté avec les aérosols d'alumine et de chlorure de sodium .....</i>	143

---

## REFERENCES

- Alloul-Marmor, L. (2002)** Réentraînement par écoulement d'air d'une contamination particulaire déposée sur une surface, application au cas d'un tas de poudre. *Thèse de doctorat de l'Université de Paris XII*.
- Ariman, T., Helfritch, D. (1977)** How relative humidity cuts pressure drop in fabric filters. *Filtration & Separation*. March/April, pp 127-130.
- Artous, S. (2005)** Définition des caractéristiques techniques, réalisation et qualification du banc d'essais CATFISH. *Mémoire de Chimie Industrielle – Génie des Procédés, CNAM PARIS*.
- Artous, S., Bouilloux, L., Norvez, O. (2005)** CATFISH Une installation dédiée au colmatage des filtres THE à petits plis sous humidité. *21<sup>ème</sup> Congrès Français sur les Aérosols, Paris*.
- Bau, S. (2003)** Eléments de physique et de caractérisation des aérosols. Revue bibliographique. *Rapport INRS/MP/LMA/06-01*.
- Bergman W, Taylor, R. D., Miller, H. H. (1978)** Enhanced filtration program at Lawrence Livermore Laboratory ; a progress report. *15th DOE/NRC Nuclear Air Cleaning Conference*.
- Biskos, G., Malinowski, A., Russell, L. M., Buseck, P. R., Martin, S. T. (2006)** Nanosize effect on the deliquescence and efflorescence of sodium chloride particles. *Aerosol Science and Technology*, 40, pp 97-106.
- Bonnevie-Perrier, J. C. (2008)** Etude du comportement des aérosols microbiens dans les filtres des réseaux de ventilation du bâtiment. *Thèse de doctorat de l'Université de Nantes*.
- Bouilloux, L. (2006)** Filtres à Très Haute Efficacité (THE). *Fiche technique de la base BADORIS relative à une barrière de sécurité (BTS), INERIS*.
- Bouilloux, L., Artous, S., Laborde, J. C., Norvez, O. (2003)** Modélisation du colmatage des filtres THE industriels par des aérosols solides. *19<sup>ème</sup> Congrès Français sur les Aérosols, Paris*.
- Briand, A., Laborde, J. C., Mocho, V. M. (1998)** Influence de la vitesse de filtration sur le colmatage de filtres THE plissés pour différents types d'aérosols. *14<sup>ème</sup> Congrès Français sur les Aérosols, Paris*.
- Brown, A. S., Yardley, R. E., Quincey, P. G., Butterfield, D. M. (2006)** Studies of the effect of humidity and other factors on some different filter materials used for gravimetric measurements of ambient particulate matter. *Atmospheric Environment*, 40, pp 4670-4678.
- Brutt, M. (2007)** B- Instrumentation en microscopie interférométrique pour la métrologie des matériaux semi-conducteurs. *Rapport d'activité de l'Institut d'Electronique du Solide et des Systèmes de Strasbourg 2003-2007*.
- Butt, H. J., Kappl, M. (2009)** Normal capillary forces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 146, pp 48-60.
- Callé, S. (2000)** Etude des performances des media filtrants utilisés en dépolluage industriel. *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine*.
- Callé-Chazelet, S., Artous, S., Joubert, A., Thomas, D., Bouilloux, L., Remy, J.F. (2008 a)** Study of pressure drop and aerosol penetration during clogging of mini-pleated air filters. *10th World Filtration Congress, Leipzig*.
- Callé-Chazelet, S., Thomas, D., Vallières, C. (2008 b)** Filtration sous humidité – 3<sup>ème</sup> rapport. *Rapport LSGC-SISYPHE R-08/3*.
- Charvet, A. (2008)** Filtration d'aérosols liquides par un filtre à fibres placé en position horizontal. *Thèse de doctorat de l'Université de Savoie*.
- Chay, E., Chen, D. R. (2004)** Relative humidity effect on the filter loading characteristics. *9th World Filtration Congress, Nouvelle Orleans*.
- Coelho, M. C., Harnby, N. (1978)** The effect of humidity on the form of water retention in a powder. *Powder Technology*, 20, pp 197-200.
- Contal, P., Simao, J., Thomas, D., Frising, T., Callé, S., Appert-Collin, J. C., Bémer, D. (2004)** Clogging of fibre by submicron droplets. Phenomena and influence of operating conditions. *Aerosol Science*, 35, pp 263-278.
- Davies, C. N. (1973)** Air filtration. *Academic Press, London, New York*.

- Del Fabbro, L. (2001)** Modélisation des écoulements d'air et du colmatage des filtres plissés par des aérosols solides. *Thèse de doctorat de l'Université Paris XII.*
- Ebert, M., Inerle-Hof, M., Weinbruch, S. (2002)** Environmental scanning electron microscopy as a new technique to determine the hygroscopic behaviour of individual aerosol particles. *Atmospheric Environment*, 36, pp 5909-5916.
- Endo, Y., Chen, D. R., Pui, D. Y. H. (2001)** Air and water permeation resistance across dust cakes on filters-effects of particle polydispersity and shape factor. *Powder Technology*, 118, pp 24-31.
- Foster, M., Ewing, G. E. (1999)** An infrared spectroscopic study of water thin film on NaCl (100). *Surface Science*, 427-428, pp 102-106.
- Franklin, H., Knutson, E. O., Hinchliffe, L. E. (1976)** A humidity effect in the flow resistance of loaded fibrous filters. *Atmospheric Environment*, 10, pp 911-912.
- Frasing, T. (2004)** Eude de la filtration des aérosols liquides et de mélanges d'aérosols liquides et solides. *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.*
- Geryes, T. (2009)** Étude expérimentale et numérique de la dégradation de la mesure nucléaire d'aérosols radioactifs prélevés avec des filtres de surveillance. *Thèse de doctorat de l'Université Paris XII.*
- Gougeon, R. (1994)** Filtration des aérosols liquides par les filtres à fibres en régimes d'interception et d'inertie. *Thèse de doctorat de l'Université Paris XII.*
- Gregory, W. S., Martin, R.A., Smith, P. R., Leslie, Fenton, D. E. (1983)** Response of HEPA filters to simulated accident conditions. *17th DOE Nuclear Air Cleaning Conference.*
- Gupta, A., Novick, V. J., Biswas, P., Monson, P. R. (1993)** Effect of humidity and particle hygroscopicity on the mass loading capacity of high efficiency particulate air (HEPA) filter. *Aerosol Science and Technology*, 19, pp 94-107.
- Gupta, T., Demokritou, P., Koutrakis, P. (2004)** Effects of physicochemical properties of ultrafine particles on the performance of an ultrafine particle concentrator. *Aerosol Science and Technology*, 38(S2), pp 37-45.
- Hajra, M. G., Mehta, K., Chase, G. G. (2003)** Effects of humidity, temperature, and nanofibers on drop coalescence in glass fiber media. *Separation and Purification Technology*, 30, pp 79-88.
- Hinds, W. C. (1982)** Aerosol technology – Properties, behaviour and measurement of airborne particles. *John Wiley*, pp 141-149.
- Jeon, K. J., Jung, Y. W. (2004)** A simulation study on the compression behaviour of dust cakes. *Powder Technology*, 141, pp 1-11.
- Jokiniemi, J. (1990)** The effect of airborne hygroscopic matter on aerosol behaviour in severe nuclear power plant accidents. *Technical Research Centre of Finland, Publication 59.*
- Juda, J., Chrosciel, S. (1970)** Ein theoretisches Modell der Druckverlusthöhung beim Filtrationsvorgang. *Staub Reinhaltung der Luft*, 5, pp 196-198.
- Kanaoka, C., Hiragi, S. (1990)** Pressure drop of air filter with dust load. *Journal of Aerosol Science*, 21, pp 127-137.
- Krämer, L., Pöschl, U., Niessner, R. (2000)** Microstructural rearrangement of sodium chloride condensation aerosol particles on interaction with water vapor. *Journal of Aerosol Science*, 6, pp 673-685.
- Kuwabara, B. S. (1959)** The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders or spheres in a viscous flow at small Reynolds numbers. *Journal of the Physical Society of Japan*, 14, 4, pp 527-532.
- Laborde, J.C. (2000)** Etat de l'art sur le comportement des filtres THE soumis à des contraintes d'humidité d'air élevée. *Rapport d'étude IRSN/SERAC/LECEV/00-16.*
- Laborde, J. C., Del Fabbro, L., Mocho, V. M., Ricciardi, L. (2002)** Contribution to the modelling of industrial pleated filters clogging by solid particles. *Workshop on particle loading and filtration kinetics in fibrous aerosol, University of Karlsruhe.*
- Lee, K. W., Liu, B. Y. H. (1982)** Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filter. *Aerosol Science and Technology*, 1, pp 147-161.
- Leinert, S., Wiedensohler, A. (2008)** A DMA and APS based technique for measuring aerodynamic hygroscopic growth factors of micrometer-size aerosol particles. *Aerosol Science*, 39, pp 393-402.

- Letourneau, P., Mulcey, P., Vendel, J. (1990)** Aerosol penetration inside HEPA filtration media. *21st DOE/NRC Nuclear Air Cleaning Conference*.
- Liew, T. P., Conder, J. R. (1985)** Fine mist filtration by wet filters – I. liquid saturation and flow resistance of fibrous filters. *Journal of Aerosol Science*, 16, 6, pp 497-509.
- Lorimier, C. (2005)** Traitement combiné de composés organiques volatils et de particules sur médias fibreux - Applications au traitement de l'air. *Thèse de doctorat de l'Université de Nantes*.
- Melis, S., Querre, P., Ricciardi, L. (2008)** Modèles physiques du code SYLVIA. *Rapport IRSN/DPAM/SEMIC-2008-020*.
- Merlin, P., Artous, S., Laborde, J.C., Mocho, V. M. (2000)** Influence de la vitesse de filtration sur le colmatage en milieu gazeux d'un médium filtrant plan par des aérosols solides. *16<sup>ème</sup> Congrès Français sur les Aérosols*.
- Miguel, A. F. (1998)** Airflow through porous screens: from theory to practical considerations. *Energy and Buildings*, 28, pp 63-69.
- Miguel, A. F. (2003)** Effect of air humidity on the evolution of permeability and performance of a fibrous filter during loading with hygroscopic and non-hygroscopic particles. *Journal of Aerosol Science*, 34, pp 783-99.
- Mikhailov, E. F., Vlasenko, S. S., Krämer, L., Niessner, R. (2001)** Interaction of soot aerosol particles with water droplets: influence of surface hydrophilicity. *Journal of Aerosol Science*, 32, pp 697-711.
- Mocho, V. M. (2005)** Mesure du coefficient d'épuration d'un filtre THE selon la norme d'essais NF X 44-011. *Mode opératoire d'essais, rapport IRSN/DSU/SERAC/LECEV/MOP-06*.
- Mocho, V. M. (2007)** Résultats des essais exploratoires et proposition d'un programme d'essais à réaliser dans le cadre du sous-programme 2 du PIC Filtration. *Rapport IRSN/DSU/SERAC/LECEV/07-25*.
- Mocho, V. M., Lelandais, T. (2008)** Etat d'avancement du sous-programme 2 du PIC filtration : influence du colmatage et d'une fuite sur le coefficient d'épuration de filtres THE, en fonction de la granulométrie et du débit de filtration. *Rapport IRSN/DSU/SERAC/LECEV/08-38*.
- Mocho, V. M., Ouf, F. X. (2009)** Influence de différents paramètres sur le colmatage des filtres THE industriels par les aérosols formés en cas de feux de matériaux solides. *24<sup>ème</sup> Congrès Français sur les Aérosols, Paris*.
- Nishioka, G. M. (1990)** Adsorption/Desorption of water on glass fiber surfaces. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 120, pp 34-39.
- Normann, B. (1987)** The effects of high relative humidities on HEPA filter media. *19th DOE/NRC Nuclear Air Cleaning Conference*.
- Norme NF X 44-011 (1972)** Méthode de mesure de l'efficacité des filtres au moyen d'un aérosol d'uranine (fluorescéine). *Norme d'essais*.
- Novick, V. J., Monson, P. R., Ellison, P. E. (1992)** The effect of solid particle mass loading on the pressure drop of HEPA filters. *Journal of Aerosol Science*, 23, 6, pp 657-665.
- Payatakes, A. C. (1976)** Model of the dynamic behaviour of a fibrous filter. Application to the case of pure interception during period of hindered growth. *Powder Technology*, 14, pp 267-278.
- Payet, S. (1991)** Etude de la performance de filtres à fibres lors de la filtration d'aérosols liquides ou solides submicroniques. *Thèse de doctorat de l'Université Paris XII*.
- Pénicot, P., Thomas, D., Contal, P., Leclerc, D., Vendel, J. (1999)** Clogging of HEPA fibrous filters by solid and liquid aerosol particles: an experimental study. *Filtration & Separation, March 1999*, pp 59-64.
- Pénicot-Bauge, P. (1998)** Etude de la performance de filtres à fibres lors de la filtration d'aérosols liquides ou solides submicroniques. *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine*.
- Pradel, J., Brion, J. (1970)** Méthode d'essais des filtres à haute efficacité par aérosol d'uranine. *Thermique et Aéraulique 01*.
- Raynor, P.C., Leith, D. (2000)** The influence of accumulated liquid on fibrous filter performance. *Journal of Aerosol Science* 31, 1, pp 19-34.
- Renoux, A., Boulaud, D. (1998)** Les Aérosols - Physique et Métrologie. *Lavoisier Technique et documentation*.
- Ricketts, C. I., Ruedinger, V., Wilhelm, J. G. (1987)** HEPA-filter behaviour under high humidity airflows. *19th DOE/NRC Nuclear Air Cleaning Conference*.

- Ricketts, C. I., Ruedinger, V., Wilhelm, J. G. (1989)** The flow resistance of HEPA filters in supersaturated airstreams. *20th DOE/NRC Nuclear Air Cleaning Conference*.
- Ricketts, C. I., Schneider, M., Wilhelm, J.G. (1991)** Mathematical models for changes in HEPA filter pressure drop caused by high air humidity. *21st DOE/NRC Nuclear Air Cleaning Conference*.
- Ristovski, Z. D., Morawska, L., Hitchins, J., Barron, W. (1998)** Influence of the sheath air humidity on the SMPS measurements of hygroscopic aerosols. *Journal of Aerosol Science*, 29, 1, pp S327-S328.
- Rogers, R. R., Yau, M. K. (1989)** A short course in cloud physics. *Third Edition, PERGAMON PRESS*.
- Seinfeld, J. H. (1986)** Atmospheric chemistry and physics of air pollution. *John Wiley and Sons*.
- Sjogren, S., Gysel, M., Weingartner, E., Baltensperger, U., Cubison, M. J., Coe, H., Zardini, A. A., Marcolli, C., Krieger, U. K., Peter, T. (2007)** Hygroscopic growth and water uptake kinetics of two-phase aerosol particles consisting of ammonium sulphate, adipic and humic acid mixtures. *Journal of Aerosol Science*, 38 pp 157-171.
- Smith, P. R., Leslie, I. H., Hensel, E. C., Schultheis, T. M., Walls, J. R. (1993)** Structural testing of salt loaded HEPA filters WIPP. *22nd DOE/NRC Nuclear Air Cleaning and Treatment Conference*.
- Svenningsson, B., Hansson, H. C., Martinsson, B., Wiedensohler, A., Swietlicki, E., Cederfelt, S. I., et al. (1997)** Cloud droplet nucleation scavenging in relation to the size and hygroscopic behaviour of aerosol particles. *Atmospheric Environment*, 31, 16, pp 2463-2475
- Tang, I. N. (2000)** Phase transformation and growth of hygroscopic aerosols. *Aerosol Chemical Processes in the Environment, Chapter 4*, pp 61-80.
- Thomas, D (2001)** Etude de la filtration des aérosols par des filtres à fibres. *Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université Henri Poincaré de Nancy*.
- Thomas, D., Pénicot, P., Contal, P., Leclerc, D., Vendel, J. (2001)** Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles Experimental and modelling study. *Chemical Engineering Science*, 56, pp 3549-3561.
- Tsilingiris, P. T. (2008)** Thermophysical and transport properties of humid air at temperature between 0 and 100 °C. *Energy Conversion and Management*, 49, pp 1098-1110.
- Vendel, J., Letourneau, P. (1995)** Effect of humidity on the filter pressure drop. *23rd DOE/NRC Nuclear Air Cleaning and Treatment Conference*.
- Walsh, D. C. (1996)** Recent advances in the understanding of fibrous filter behaviour under solid particle load. *Filtration and Separation, June 1996*, pp 501-505.
- Weingartner, E., Baltensperger, U., Burtscher, H. (1995)** Growth and structural changes of combustion aerosols at high relative humidity. *Journal of Aerosol Science*, 26, 1, pp 667-668.
- Witschger, O., Wrobel, R., Fauvel, S., Basso, G., Gensdarmes, F. (2002)** Détermination expérimentale de facteurs de forme dynamique par comparaison des techniques coulter et impacteur en cascade. *18<sup>ème</sup> Congrès Français sur les Aérosols, Paris*.

## **LISTE DES PUBLICATIONS ET DES COMMUNICATIONS**

### 2008

**Joubert, A., Laborde, J. C., Artous, S., Bouilloux, L., Chazelet, S., Thomas, D.** Influence de l'humidité sur le comportement aéraluque des filtres plissés à Très Haute Efficacité. 23<sup>ème</sup> *Congrès Français sur les Aérosols, 16-17 janvier 2008.*

**Callé-Chazelet, S., Artous, S., Joubert, A., Thomas, D., Bouilloux, L., Remy, J. F.** Study of pressure drop and aerosol penetration during clogging of mini-pleated air filters. *10th World Filtration Congress, April 14-18 2008, Leipzig.*

**Joubert, A. (2008)** Premiers enseignements relatifs à l'influence de l'humidité sur le comportement aéraluque des filtres plissés à très haute efficacité. *Salles Propres n°55.*

### 2009

**Joubert, A., Laborde, J. C., Bouilloux, L., Thomas, D., Chazelet, S.** Influence de l'humidité sur la filtration Très Haute Efficacité d'un aérosol non-hygroscopique : cas d'un filtre plan et d'un filtre à petits plis. 24<sup>ème</sup> *Congrès Français sur les Aérosols, 14-15 janvier 2009.*

**Joubert, A., Laborde, J. C., Bouilloux, L., Thomas, D., Chazelet, S.** Experimental results and modelling of the clogging of pleated fibrous filters in presence of humidity. *European Aerosol Conference, September 6-11 2009, Karlsruhe.*

**Joubert, A., Laborde, J. C., Bouilloux, L., Thomas, D., Chazelet, S.** Effect of air humidity on the clogging of mini-pleated and plane HEPA filters by hygroscopic and non-hygroscopic particles. *Filtech, October 13-15 2009, Wiesbaden.*

### A venir

**Joubert, A., Laborde, J. C., Bouilloux, L., Thomas, D., Chazelet, S.** Influence de l'humidité sur le colmatage de filtres THE à petits plis par des aérosols hygroscopique et non-hygroscopique. 25<sup>ème</sup> *Congrès Français sur les Aérosols, 13-14 janvier 2010.*

---

## ANNEXES

<b>ANNEXE I Modélisation de la filtration en surface pour un aérosol monodispersé et un aérosol polydispersé .....</b>	<b>162</b>
<b>ANNEXE II Phénomène d'adsorption .....</b>	<b>165</b>
<b>ANNEXE III Modélisation de la croissance d'un aérosol hygroscopique en fonction de l'humidité .....</b>	<b>167</b>
<b>ANNEXE IV Qualification du débitmètre à ultrasons .....</b>	<b>168</b>
<b>ANNEXE V Diamètres statistiques des particules .....</b>	<b>170</b>
<b>ANNEXE VI Prélèvement isocinétique .....</b>	<b>171</b>
<b>ANNEXE VII Facteur de forme dynamique de l'aérosol d'alumine.....</b>	<b>173</b>
<b>ANNEXE VIII Comparaison des distributions granulométriques des aérosols étudiés avec une loi log normale .....</b>	<b>174</b>
<b>ANNEXE IX Statistiques et incertitudes .....</b>	<b>176</b>

## ANNEXE I Modélisation de la filtration en surface pour un aérosol monodispersé et un aérosol polydispersé

Novick (1992) considère que la perte de charge du filtre résulte de deux contributions :

- la perte de charge du filtre vierge seul  $\Delta P_0$ ,
- la perte de charge due au dépôt  $\Delta P_G$ .

Ce modèle suppose que la perte de charge due aux particules pénétrant à l'intérieur du filtre est négligeable. De plus, l'auteur considère que la compacité du dépôt qui se forme est constante et indépendante de l'épaisseur du gâteau. Ainsi la perte de charge du filtre s'écrit :

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_G \quad (\text{AI-1})$$

La perte de charge à travers le gâteau de particules provient de la force de traînée agissant sur chaque particule individuelle composant le gâteau. En distinguant la vitesse interstitielle entre les particules et la vitesse superficielle, la perte de charge à travers le gâteau de particules s'écrit :

$$\Delta P_G = F_D \cdot \frac{U_i}{U_f} \cdot \varepsilon_g \quad (\text{AI-2})$$

$F_D$  est la somme de toutes les forces de traînée agissant sur chaque particule par unité de volume du gâteau de particules.  $U_i$  est la vitesse interstitielle reliée à la vitesse superficielle  $U_f$  par la compacité du gâteau selon l'équation :

$$U_f = U_i \cdot \varepsilon_g \quad (\text{AI-3})$$

En régime de Stokes, la force de traînée agissant sur une particule de forme quelconque formant le gâteau est donnée par l'équation (Endo *et al.*, 1998) :

$$F_d = 3\pi \cdot \mu \cdot d_{ev} \cdot \chi \cdot U_i \quad (\text{AI-4})$$

avec  $d_{ev}$  le diamètre équivalent en volume de l'aérosol.

Pour définir la somme de chaque force de traînée agissant sur les particules  $F_D$ , il faut tenir compte du fait que les particules sont en contact avec leurs voisines. Quels que soient les auteurs (Novick *et al.*, 1992, Endo *et al.*, 2001, Gupta *et al.*, 1993), la prise en compte de la proximité des particules les unes par rapport aux autres passe par la création d'un facteur dépendant de la porosité du gâteau. Endo *et al.* (1998) définissent ainsi une fonction de vide  $\upsilon(\varepsilon_g)$  et expriment la force totale de traînée selon l'expression :

$$F_D = \int_{-\infty}^{+\infty} F_d \cdot \upsilon(\varepsilon_g) \cdot n_t \cdot f(d_{ev}) \cdot d(d_{ev}) \quad (\text{AI-5})$$

avec  $n_t$  le nombre total de particules par unité de volume du gâteau de particules. La relation entre la porosité et le nombre de particules par unité de volume  $n_t$  s'écrit :

$$\varepsilon_g = 1 - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\pi}{6} \cdot d_{ev}^3 \cdot n_t \cdot f(d_{ev}) \cdot d(d_{ev}) \quad (\text{AI-6})$$

### Aérosol monodispersé sphérique

Dans le cas où l'aérosol est monodispersé et sphérique, la force totale de traînée s'exprime selon l'expression :

$$F_D = F_d \cdot \upsilon(\varepsilon_g) \cdot n_t \quad (\text{AI-7})$$

La force de traînée agissant sur une particule sphérique s'écrit :

$$F_d = 3\pi \cdot \mu \cdot d_p \cdot U_i \quad (\text{AI-8})$$

La relation entre la porosité  $\varepsilon_g$  et le nombre de particules par unité de volume du gâteau de particules s'écrit :

$$\varepsilon_g = 1 - \frac{\pi}{6} \cdot d_p^3 \cdot n_t \quad (\text{AI-9})$$

Ainsi, l'équation (AI-2) exprimant la perte de charge à travers le gâteau de particules s'écrit :

$$\Delta P_G = \frac{18v(\varepsilon_g)(1-\varepsilon_g)}{\varepsilon_g^2} \cdot \frac{\mu \cdot e_g \cdot U_f}{d_p^2} \quad (\text{AI-10})$$

L'épaisseur du gâteau de particules s'exprime en fonction de la masse de particules déposées sur le filtre selon l'équation :

$$e_g = \frac{m_s}{\rho_p \cdot (1-\varepsilon_g) S_f} \quad (\text{AI-11})$$

En intégrant l'équation (AI-11) à l'équation (AI-10) et en ajoutant le coefficient de Cunningham, la perte de charge à travers le gâteau de particules s'écrit :

$$\Delta P_G = \frac{18v(\varepsilon_g)}{\varepsilon_g^2} \cdot \frac{\mu}{d_p^2 \cdot \rho_p \cdot Cu(d_p)} \cdot \frac{m_s \cdot U_f}{S_f} \quad (\text{AI-12})$$

Ainsi, la perte de charge d'un filtre THE durant son colmatage par un aérosol solide s'exprime sous la forme :

$$\Delta P = K_1 \cdot \mu \cdot U_f + K_2 \cdot \frac{m_s \cdot U_f}{S_f} \quad (\text{AI-13})$$

avec  $K_2$  la résistance spécifique du gâteau de particules. Kozeny et Carman ont proposé une expression pour la fonction de vide  $v(\varepsilon_g)$  égale à :

$$v(\varepsilon_g) = \frac{2h_k \cdot (1-\varepsilon_g)}{\varepsilon_g} \quad (\text{AI-14})$$

avec  $h_k$  la constante de Kozeny qui est égale à 4,8 pour des sphères et à 5,0 pour des particules de formes irrégulières selon Novick *et al.* (1992). Ainsi, la résistance spécifique d'un gâteau formé de particules monodispersées et sphériques selon Kozeny et Carman s'écrit :

$$K_2 = \frac{36 \cdot \mu \cdot h_k \cdot (1-\varepsilon_g)}{\varepsilon_g^3 \cdot \rho_p \cdot Cu(d_p) d_p^2} \quad (\text{AI-15})$$

Une autre expression empirique de  $v(\varepsilon_g)$  est proposée par Rudnick and First (1978), cité par Gupta *et al.* (1993) :

$$v(\varepsilon_g) = \varepsilon_g^2 \frac{3 + 2 \cdot (1-\varepsilon_g)^{5/3}}{3 - 4,5 \cdot (1-\varepsilon_g)^{1/3} + 4,5 \cdot (1-\varepsilon_g)^{5/3} - 3 \cdot (1-\varepsilon_g)^2} \quad (\text{AI-16})$$

Ces deux expressions de  $v(\varepsilon_g)$  nécessitent la connaissance de la porosité du gâteau qui est un paramètre expérimental très difficile à déterminer.

#### Aérosol polydispersé suivant une loi log normale

La fonction de distribution d'une particule suivant une loi log normale s'écrit :

$$f(\ln d_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_g}} \exp\left(-\frac{(\ln d_p - \ln \bar{d}_{g,n})^2}{2 \ln^2 \sigma_g}\right) \quad (\text{AI-17})$$

avec  $\bar{d}_{g,n}$  le diamètre géométrique moyen de la distribution en nombre (ou encore le diamètre médian en nombre). Dans le cas où l'aérosol suit une loi de distribution log normale, la force totale de traînée s'exprime selon l'expression :

$$F_D = \int_{-\infty}^{+\infty} F_d \cdot v(\varepsilon_g) \cdot n_t \cdot f(\ln d_{ev}) \cdot d(\ln d_{ev}) \quad (\text{AI-18})$$

qui peut se simplifier en considérant la relation mathématique suivante (Endo *et al.*, 2001) :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d_p^k}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_g}} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln d_p - \ln \bar{d}_{g,n})^2}{2 \ln^2 \sigma_g}\right) \cdot d(\ln d_p) = \exp\left(k \cdot \ln \bar{d}_{g,n} + \frac{k^2}{2} \cdot \ln^2 \sigma_g\right) \quad (\text{AI-19})$$

Ainsi, l'équation (AI-18) s'écrit :

$$F_D = 3\pi \cdot \mu \cdot \chi \cdot \frac{U_f}{\varepsilon_g} \cdot v(\varepsilon_g) \cdot n_t \cdot \bar{d}_{ev,g} \cdot \exp\left(\frac{1}{2} \ln^2 \sigma_g\right) \quad (\text{AI-20})$$

avec  $\bar{d}_{ev,g}$  le diamètre géométrique moyen de la distribution avec les diamètres équivalents en volume et  $\chi$  le facteur de forme dynamique de l'aérosol. La relation entre la porosité et le nombre de particules par unité de volume  $n_t$  s'écrit :

$$\varepsilon_g = 1 - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\pi}{6} \cdot d_{ev}^3 \cdot n_t \cdot f(\ln d_{ev}) \cdot d(\ln d_{ev}) \quad (\text{AI-21})$$

D'après la relation mathématique (AI-19), la porosité peut s'écrire :

$$\varepsilon_g = 1 - \frac{\pi}{6} \cdot n_t \cdot \exp\left(3 \ln \bar{d}_{ev,g} + \frac{9}{2} \ln^2 \sigma_g\right) \quad (\text{AI-22})$$

En substituant les équations (AI-20) et (AI-22) dans l'équation (AI-2) la perte de charge à travers le gâteau de particules s'exprime selon l'équation suivante :

$$\Delta P_G = \frac{18\nu(\varepsilon_g)(1 - \varepsilon_g)}{\varepsilon_g^2} \cdot \frac{\mu \cdot U_f \cdot e_g \cdot \chi}{\bar{d}_{ev,g}^2 \cdot \exp(4 \ln^2 \sigma_g)} \quad (\text{AI-23})$$

En intégrant l'équation (AI-11) à l'équation (AI-23) et en ajoutant le coefficient de Cunningham, la perte de charge à travers un gâteau formé de particules non-sphériques suivant une loi log-normale s'écrit :

$$\Delta P_G = \frac{18\nu(\varepsilon_g)}{\varepsilon_g^2} \cdot \frac{\mu \cdot \chi}{\bar{d}_{ev,m}^2 \cdot \rho_p \cdot Cu \cdot \exp(4 \ln^2 \sigma_g)} \cdot \frac{m_s \cdot U_f}{S_f} \quad (\text{AI-24})$$

La résistance spécifique du gâteau de particules s'exprime donc par la relation :

$$K_2 = \frac{\nu(\varepsilon_g)}{\varepsilon_g^2} \cdot \frac{18\mu \cdot \chi}{\bar{d}_{ev,g}^2 \cdot \rho_p \cdot Cu \cdot \exp(4 \ln^2 \sigma_g)} \quad (\text{AI-25})$$

Le diamètre géométrique de la distribution en volume est relié au diamètre médian par la relation :

$$\bar{d}_{ev,g} = \tilde{d}_{ev,m} \cdot \exp(-3,5 \ln^2 \sigma_g) \quad (\text{AI-26})$$

Ainsi, la résistance spécifique du gâteau de particules s'écrit :

$$K_2 = \frac{\nu(\varepsilon_g)}{\varepsilon_g^2} \cdot \frac{18\mu \cdot \chi}{\tilde{d}_{ev,m}^2 \cdot \rho_p \cdot Cu \cdot \exp(-3 \ln^2 \sigma_g)} \quad (\text{AI-27})$$

En considérant la fonction de vide  $v(\varepsilon_g)$  proposée par Kozeny et Carman, la résistance spécifique du gâteau de particules a pour expression :

$$K_2 = \frac{36h_k \cdot (1 - \varepsilon_g)}{\varepsilon_g^3} \cdot \frac{\mu \cdot \chi}{\tilde{d}_{ev,m}^2 \cdot \rho_p \cdot Cu \cdot \exp(-3 \ln^2 \sigma_g)} \quad (\text{AI-28})$$

## ANNEXE II Phénomène d'adsorption

L'adsorption est un phénomène tout à fait général qui se produit chaque fois qu'un gaz ou un liquide est en contact avec un solide ; celui-ci est retenu par les atomes superficiels du solide et se concentre à sa surface. Le phénomène inverse, par lequel les molécules adsorbées sur une surface s'en détachent, notamment sous l'action de l'élévation de la température, ou de la baisse de pression, se nomme la désorption.

Deux types de forces sont responsables des interactions qui peuvent s'établir entre le solide adsorbant et le fluide adsorbable et conduisent traditionnellement à distinguer deux types d'adsorption :

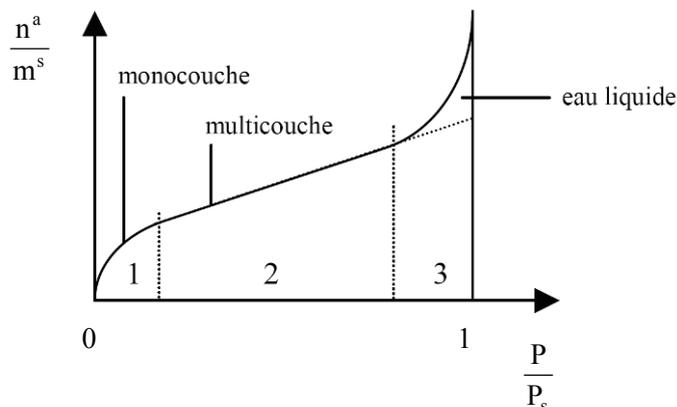
- l'adsorption physique ou physisorption : elle met en jeu des liaisons faibles, du type forces de van der Waals, analogues à celles qui sont impliquées lors d'une liquéfaction. Elle se produit bien avant que le gaz n'atteigne une pression égale à sa pression de vapeur saturante, à des températures assez basses et voisines du point d'ébullition de la phase adsorbée. Elle est en général réversible et on peut la comparer au dépôt de buée sur une paroi froide. L'équilibre est obtenu lorsque les vitesses d'évaporation et de condensation sont égales. L'adsorption physique est donc favorisée par une baisse de la température ;
- l'adsorption chimique ou chimisorption : elle met en jeu des énergies de liaison importantes et s'accompagne d'une profonde modification de la répartition des charges électroniques des molécules adsorbées ; les forces mises en jeu sont du même type que celles qui sont impliquées lors de la formation des liaisons chimiques. Elle est souvent irréversible (ou difficilement réversible) et engendre une couche monomoléculaire.

En général, l'adsorption est un phénomène exothermique qui diminue si la température augmente et la désorption un phénomène endothermique.

### Forme générale des isothermes de sorption

Les isothermes d'adsorption/désorption présentent en général trois zones, visualisées dans le cas de la sorption de l'eau, sur la figure ci-dessous, chacune correspondant à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit :

- zone 1 : constitution d'une monocouche moléculaire à la surface du produit. Elle est caractéristique de l'action des forces de Van der Waals entre les groupements hydrophiles et les molécules d'eau. L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant toute la surface externe des pores du produit. L'eau est dans un état rigide en raison de l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface. Le passage à la zone suivante s'effectue quand toute la surface est saturée ;
- zone 2 : adsorption des molécules sur la monocouche initiale. L'isotherme est linéaire dans cette zone et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide ;
- zone 3 : l'épaisseur de la pellicule est suffisante pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau microcapillaire constitue une phase continue.



*Les différentes zones des isothermes de sorption de l'eau*

Le rapport  $\frac{n^a}{m^s}$  correspond à la quantité de substances adsorbées par masse d'adsorbant ( $\text{mol.kg}^{-1}$ ).

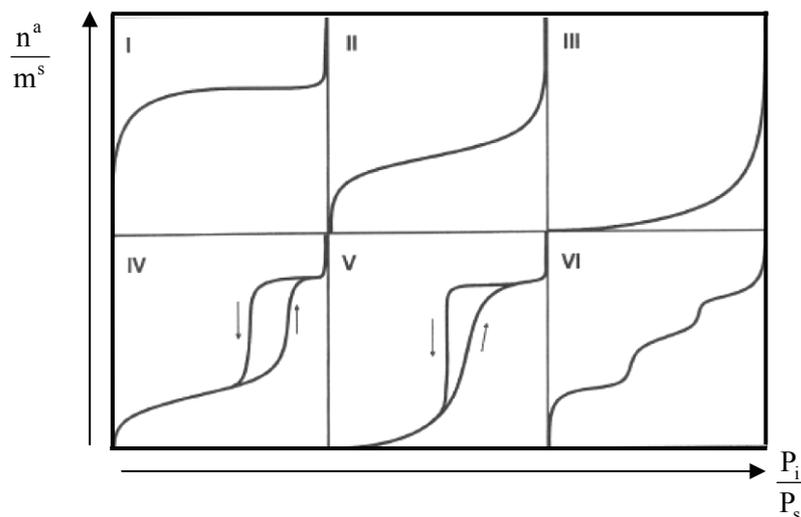
La cinétique d'adsorption est commandée par :

- les conditions de transfert des molécules du corps à adsorber au sein du liquide (vitesse de diffusion propre de la molécule, turbulence au voisinage de l'adsorbant),
- la concentration du soluté adsorbable,
- la surface offerte (liée à la quantité d'adsorbant et à la surface spécifique de l'adsorbant),
- le nombre de composés à adsorber.

#### Classification des isothermes d'adsorption physique

Il existe six différents types d'isothermes, représentés sur la figure ci-dessous, correspondant chacune à un type différent d'interaction et de porosité :

- type I : le milieu ne contient que des micropores saturés pour de faibles valeurs de  $\frac{P_i}{P_s}$  ; il ne se produit ensuite aucune adsorption pour les valeurs plus élevées qui permettraient de remplir des mésopores ;
- type II : le milieu est non poreux ou macroporeux ; cette isotherme est caractéristique d'une adsorption multimoléculaire : épaissement progressif de la couche adsorbée ;
- type III : le milieu est du même type que pour les isothermes de type II mais les interactions milieu poreux gaz adsorbé sont faibles. Ce type d'isotherme est rarement rencontré ;
- type IV : l'isotherme est identique à celle du type II aux basses pressions, un palier de saturation se développe aux hautes pressions. Elle correspond à un milieu mésoporeux dans lequel se produit une condensation capillaire. Le phénomène n'est pas réversible ; en général une hystérésis apparaît entre les courbes d'adsorption et de désorption ;
- type V : le milieu est du même type que pour les isothermes de type IV, mais les interactions milieu poreux/gaz adsorbé sont faibles. Ce type d'isotherme est rarement rencontré ;
- type VI : cette isotherme correspond à un milieu poreux dans lequel les couches adsorbées se forment les unes après les autres.



*Les différents types d'isothermes d'adsorption physique*

### ANNEXE III Modélisation de la croissance d'un aérosol hygroscopique en fonction de l'humidité

Modèle de Cinkotai (1971) cité par Krämer *et al.* (2000)

L'approche de Cinkotai est fondée sur l'utilisation de formules empiriques pour déterminer la pression de vapeur saturante de l'eau, la masse volumique et la tension superficielle de la solution aqueuse de NaCl.

$$HR = 100 \cdot \left( \frac{P_{w,y}}{P_{w,0}} \right) \cdot \exp\left( \frac{4 \cdot M_w \cdot \gamma_s}{R_{GP} \cdot T \cdot \rho_w \cdot d_{m,c}} \right) \quad (\text{AIII-1})$$

$$d_{m,c} = g_c \cdot d_{m,0,c} \quad (\text{AIII-2})$$

$$g_c^3 = \frac{\rho_p}{\rho_s \cdot y} \quad (\text{AIII-3})$$

avec  $R_{GP}$  la constante des gaz parfaits,  $T$  la température du milieu,  $P_{w,0}$  et  $P_{w,y}$  (Pa) les pressions de vapeur au-dessus d'une surface plane d'eau pure et d'une solution de NaCl,  $M_w$  ( $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) et  $\rho_w$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) la masse molaire et la densité de l'eau,  $\gamma_s$  ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ) la tension superficielle de la solution de NaCl,  $d_{m,c}$  et  $d_{m,0,c}$  (m) le diamètre de la particule activée et celui de la particule sèche,  $g_c$  le facteur de croissance,  $\rho_p$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) la masse volumique du sel sec,  $\rho_s$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) la masse volumique de la solution et  $y$  la fraction massique de NaCl dans la solution.

Cinkotai propose de plus d'utiliser les corrélations suivantes :

$$\left( \frac{P_{w,y}}{P_{w,0}} \right) = 1 - 0,4745y - 1,7001y^2 \quad (\text{AIII-4})$$

$$\rho_s = 997 + 691,03y + 259,26y^2 \quad (\text{AIII-5})$$

$$\gamma_s = 0,072 + 0,0278y + 0,0406y^2 \quad (\text{AIII-6})$$

A 25 °C  $\rho_p = 2165 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\rho_w = 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  et  $y < 26,4$

Modèle de Ferron cité par Krämer *et al.* (2000)

Ferron calcule la pression de vapeur de l'eau par la loi de Raoult,  $\rho_s$  est estimée par une combinaison linéaire de  $\rho_p$  et  $\rho_w$ , et  $\gamma_s$  est prise égale à la tension superficielle de l'eau pure ( $\gamma_w = 0,072 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$  à 25 °C).

$$d_{m,F,0} = \frac{d_{m,F}}{g_{c,F}} = d_{m,F} \left( 1 + i \cdot \frac{M_w \cdot \rho_p}{M_p \cdot \rho_w} \cdot \frac{HR}{100 \cdot R_k - HR} \right)^{-1/3} \quad (\text{AIII-7})$$

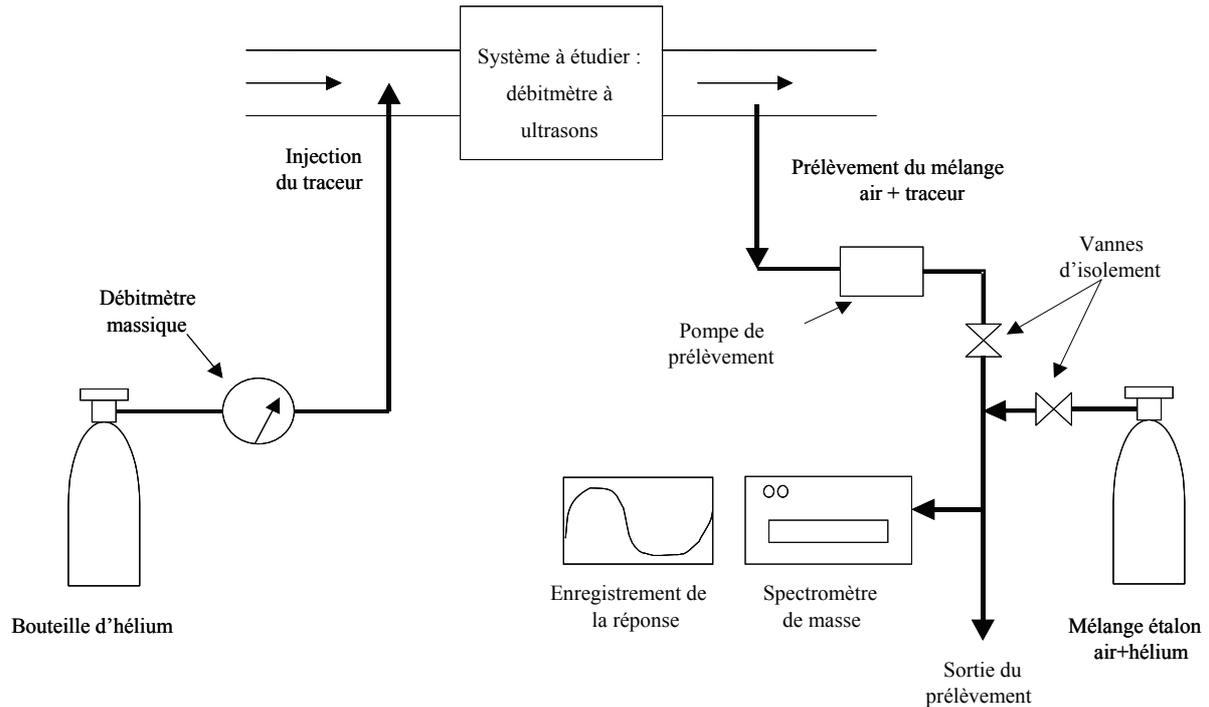
$$R_k = \exp\left( \frac{4M_w \cdot \gamma_w}{R_{GP} \cdot T \cdot \rho_w \cdot d_{m,F}} \right) \quad (\text{AIII-8})$$

avec  $M_p$  ( $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) la masse molaire du NaCl et  $i$  est le nombre d'ions dissociés (ici  $i = 2$ ).

## ANNEXE IV Qualification du débitmètre à ultrasons

### Traçage gazeux à l'hélium

Le débit gazeux  $Q$  dans un conduit de ventilation peut être déterminé par traçage gazeux. Cette méthode consiste à injecter, à débit constant, une quantité connue de traceur (hélium) dans le conduit de ventilation. Son principe repose sur la dilution du traceur gazeux utilisé dans la matrice de gaz véhiculé dans le conduit. La détermination du rapport de dilution du traceur dans le gaz du conduit permet d'accéder au débit de gaz dans le conduit puisque cette dilution est proportionnelle au débit. La figure ci-dessous illustre le schéma de montage de la mesure.



### *Traçage gazeux à l'hélium*

Le débit gazeux dans le conduit ( $Q$ ) est obtenu à partir de la relation bilan en gaz traceur lorsque le régime stationnaire est établi :

$$q \cdot C_T + Q \cdot C_0 = (Q + q) \cdot C \quad (\text{AIV-1})$$

avec  $Q$  le débit gazeux véhiculé dans le conduit ( $\text{N.m}^3.\text{h}^{-1}$ ),  $q$  le débit d'hélium injecté ( $\text{N.m}^3.\text{h}^{-1}$ ),  $C$  la concentration en traceur dans le conduit au débit considéré (ppm),  $C_T$  la concentration en traceur du traceur injecté (ppm) et  $C_0$  la concentration en traceur intrinsèque du fluide véhiculé dans le conduit (ppm).

Dans la pratique, le débit de gaz traceur  $q$  injecté est négligeable devant le débit gazeux  $Q$ . Ainsi, après simplification, la relation devient :

$$Q = \frac{q \cdot C_T}{\Delta C} \quad (\text{AIV-2})$$

avec  $\Delta C = C - C_0$ .

Des essais ont été effectués sur le banc CATFISH afin de caractériser le débitmètre à ultrasons en conditions d'air ambiant ( $\text{HR}=50\%$  et  $T=18\text{ }^\circ\text{C}$ ). Durant les essais, le débit  $Q$  mesuré par traçage gazeux a une valeur moyenne de référence  $\bar{Q}_r$  de  $210 \pm 3 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ . Le traceur est injecté dans la canalisation pendant une durée de 4 h ; les valeurs données par les deux voies du débitmètre à ultrasons sont fournies dans le tableau suivant.

*Qualification du débitmètre à ultrasons par traçage gazeux à l'hélium*

Temps (h)	0	1	2	3	4	$\bar{Q}_1$ ou $\bar{Q}_2$ (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	Ecart (%)
Voie 1 (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	206	204	206	207	208	206,2	- 1,8
Voie 2 (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	193	192	192	192	192	192,2	- 8,4

avec  $\bar{Q}_1$  et  $\bar{Q}_2$  le débit moyen mesuré respectivement par les voies 1 et 2 du débitmètre à ultrasons ; l'écart entre la valeur issue du débitmètre à ultrasons et la valeur de référence  $\bar{Q}_r$ , mesurée à l'hélium, est déterminé selon la relation :

$$\text{Ecart} = \frac{\bar{Q}_i - \bar{Q}_r}{\bar{Q}_r} \quad (\text{AIV-3})$$

avec  $i=1$  ou  $2$  selon la voie du débitmètre considérée.

Les résultats indiquent que c'est la voie 1 du débitmètre à ultrasons qui présente l'erreur de justesse la plus faible ; l'écart entre le débit issu du débitmètre à ultrasons par la voie 1 et le débit de référence reste inférieur à 2 %.

La qualification du débitmètre à ultrasons a été effectuée sur toute la gamme de débit que couvre le banc d'essais et indique des résultats similaires.

Influence de la présence d'aérosol sur la mesure

L'influence de la présence d'aérosol sur la mesure du débit par ultrasons a été étudiée. Les essais ont été effectués en conditions d'air ambiant (HR=50 % et T=18 °C) en présence de l'aérosol d'alumine et en plaçant en série, i. e. avec le bipasse fermé, le débitmètre à diaphragme (FT01) et le débitmètre à ultrasons (FT02), l'injection d'aérosol se faisant entre les deux débitmètres. Le tableau suivant présente les valeurs moyennes de débit mesurées, pour deux gammes de débit, par les deux débitmètres, ainsi que les écarts associés ; les enregistrements ont été effectués sur une durée de 30 min en conditions d'air propre et en présence d'alumine

*Qualification du débitmètre à ultrasons en présence d'aérosol*

Conditions d'essais	Air propre		Présence d'alumine	
$\bar{Q}_d$ (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	90,53	203,94	91,31	204,20
Ecart-type (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	0,12	1,00	0,48	0,70
$\bar{Q}_1$ (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	81,47	178,72	81,48	178,98
Ecart-type (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	0,13	0,51	0,51	0,24
Ecart (%)	- 10,0	- 12,4	- 10,8	- 12,3

avec  $\bar{Q}_d$  le débit moyen mesuré par le diaphragme ; l'écart entre la valeur issue du débitmètre à ultrasons et la valeur du diaphragme est déterminé selon la relation :

$$\text{Ecart} = \frac{\bar{Q}_1 - \bar{Q}_d}{\bar{Q}_d} \quad (\text{AIV-4})$$

Les résultats indiquent que l'écart entre le débit issu du débitmètre à ultrasons en présence d'aérosol et le débit fourni par le diaphragme est du même ordre de grandeur quelles que soient les conditions d'essais étudiées (air propre ou présence d'aérosol d'alumine).

## ANNEXE V Diamètres statistiques des particules

Pour un aérosol polydispersé formé de  $N$  particules, avec  $n_i$  le nombre de particules de diamètre  $d_i$ , les paramètres statistiques des distributions peuvent être calculés par les expressions suivantes :

- diamètre moyen :

$$\bar{d}_n = \frac{\sum_i n_i \cdot d_i}{N} \quad (\text{AV-1})$$

$$\bar{d}_m = \frac{\sum_i n_i \cdot d_i^4}{\sum_i n_i \cdot d_i^3} \quad (\text{AV-2})$$

- diamètre médian : il correspond à une fraction cumulée de  $\frac{1}{2}$

$$F(\tilde{d}_n) = \int_0^{\tilde{d}_n} f(d_p) dd_p = \int_{\tilde{d}_n}^{\infty} f(d_p) dd_p = \frac{1}{2} \quad (\text{AV-3})$$

avec  $f$  la fonction de distribution de fréquence ou de probabilité et  $F$  la fonction de distribution de probabilités cumulées. La distribution granulométrie en masse peut également être utilisée afin de déterminer  $\tilde{d}_m$ .

- diamètre moyen géométrique :

$$\ln \bar{d}_{g,n} = \frac{\sum_i n_i \cdot \ln d_i}{N} \quad (\text{AV-4})$$

$$\ln \bar{d}_{g,m} = \frac{\sum_i n_i \cdot d_i^3 \cdot \ln d_i}{\sum_i n_i \cdot d_i^3} \quad (\text{AV-5})$$

- écart-type géométrique :

$$\ln \sigma_{g,n} = \sqrt{\frac{\sum_i n_i \cdot (\ln d_i - \ln \bar{d}_{g,n})^2}{N-1}} \quad (\text{AV-6})$$

$$\ln \sigma_{g,m} = \sqrt{\frac{\sum_i n_i \cdot d_i^3 \cdot (\ln d_i - \ln \bar{d}_{g,m})^2}{\sum_i n_i \cdot d_i^3}} \quad (\text{AV-7})$$

## ANNEXE VI Prélèvement isocinétique

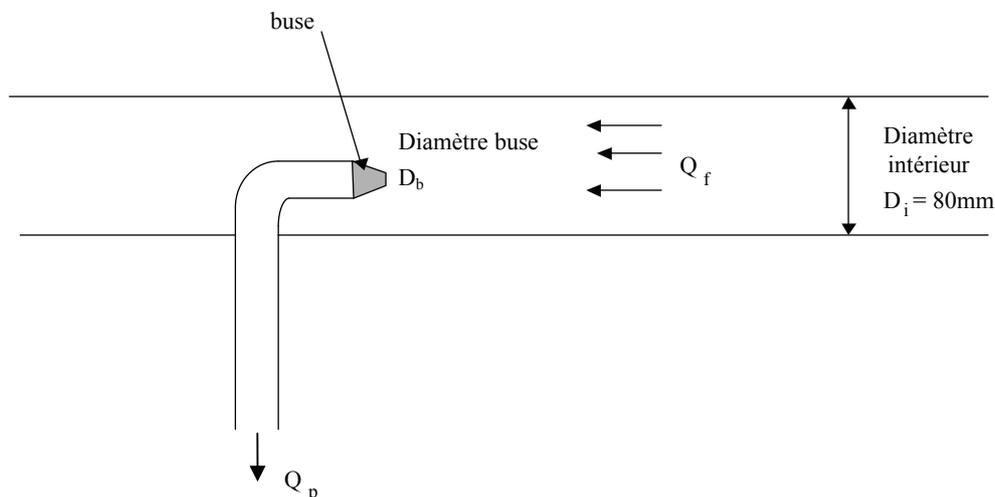
L'ensemble des prélèvements vers les appareils de mesure est effectué par l'intermédiaire d'une canne de prélèvement introduite dans la veine aéraulique. Pour assurer un prélèvement représentatif de l'aérosol véhiculé dans la veine aéraulique, il est nécessaire dans le cas de particules microniques d'effectuer le prélèvement de manière isocinétique : les lignes de courant fluide doivent pénétrer dans le dispositif de prélèvement sans être perturbées. Pour cela, l'axe de ce dispositif doit être parallèle à l'écoulement. Ainsi, la vitesse du fluide  $y$  est égale à celle du fluide au cœur de l'écoulement. Il n'y a donc pas de perte de particules au niveau de l'entrée.

De manière générale, le prélèvement isocinétique ne garantit pas qu'il n'y ait pas de perte en aval, i. e. entre l'entrée du dispositif de prélèvement et le système de mesure. En revanche, il permet de s'assurer que la concentration et la distribution granulométrique des particules entrant dans ce dispositif sont les mêmes qu'au cœur de l'écoulement (Hinds, 1999).

Lorsque l'isocinétisme n'est pas respecté, deux cas de figure se présentent avec un dispositif de prélèvement parallèle à l'écoulement (Hinds, 1999) :

- si la vitesse de prélèvement est supérieure à la vitesse au cœur du fluide, la concentration est sous-estimée (prélèvement superisocinétique) : les lignes de courant fluide convergent vers l'entrée et les particules ayant trop d'inertie ne peuvent pas suivre cette convergence ; ainsi, il y a un enrichissement en fines particules dans le prélèvement,
- au contraire, si la vitesse de prélèvement est inférieure à la vitesse au cœur du fluide, la concentration est surestimée (prélèvement subisocinétique) : les lignes de courant divergent au niveau de l'entrée et les particules ayant trop d'inertie ne peuvent pas suivre les lignes de courant divergentes et s'engouffrent dans l'entrée ; ainsi, il y a un enrichissement en grosses particules dans le prélèvement.

Pour cela, les cannes de prélèvement sont munies de buse de prélèvement adaptable en fonction de l'écoulement d'air dans la veine aéraulique et également du débit de prélèvement de l'appareil de mesure. La figure ci-dessous représente le schéma de principe d'un prélèvement isocinétique dans le banc d'essais.



*Schéma de principe du prélèvement*

Le diamètre de la buse de prélèvement  $D_b$  à utiliser pour garantir l'isocinétisme du prélèvement se détermine selon la formule :

$$D_b = D_i \cdot \sqrt{\frac{Q_p}{Q_f}} \quad (\text{AVI-1})$$

avec  $Q_f$  le débit d'air dans la veine aéraulique,  $D_i$  la section de la veine aéraulique au niveau du prélèvement et  $Q_p$  le débit de prélèvement. Cette relation permet de déterminer le diamètre théorique de la buse ; il faut ensuite utiliser la buse ayant le diamètre normalisé le plus proche de cette valeur pour effectuer le prélèvement. Le tableau ci-dessous propose quelques exemples de diamètres de buse en fonction de l'appareil de mesure pour un débit de fonctionnement  $Q_f$  de  $43 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

Appareil de mesure	$Q_p$ ( $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$D_b$ théorique (mm)	$D_b$ normalisé (mm)
APS	5	6,7	7
SMPS	0,3	1,6	4
Néphélomètre	2	4,2	4

*Détermination du diamètre de buse pour un prélèvement isocinétique en fonction de l'appareil de mesure pour un débit de fonctionnement de  $43 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$*

L'ensemble des prélèvements effectués sur le banc d'essai a été réalisé au débit nominal de filtration des filtres plissés de  $43 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , correspondant à une vitesse caractéristique des aérosols de  $2,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## ANNEXE VII Facteur de forme dynamique de l'aérosol d'alumine

*Détermination du facteur de forme dynamique de l'aérosol d'alumine à partir des distributions granulométriques en diamètre aérodynamique et en diamètre équivalent volume*

$d_{ae}$ APS ( $\mu\text{m}$ )	Fréquence cumulée (-)	$d_{ev}$ Malvern ( $\mu\text{m}$ )	Fréquence cumulée (-)	$d_{ae}$ APS calculé ( $\mu\text{m}$ )	Cu ( $d_{ae}$ ) (-)	Cu ( $d_{ev}$ ) (-)	$\chi$ (-)
0,26	0,00	0,06	0,00	0,59	1,27	4,68	0,12
0,54	0,00	0,07	0,01	0,73	1,22	4,07	0,10
0,58	0,00	0,08	0,01	0,87	1,18	3,62	0,09
0,63	0,00	0,09	0,02	1,01	1,16	3,28	0,08
0,67	0,00	0,10	0,03	1,16	1,14	2,90	0,07
0,72	0,01	0,12	0,04	1,30	1,12	2,55	0,08
0,78	0,01	0,14	0,06	1,44	1,11	2,30	0,08
0,84	0,01	0,16	0,07	1,58	1,10	2,12	0,08
0,90	0,01	0,19	0,09	1,71	1,09	1,95	0,08
0,97	0,02	0,22	0,10	1,83	1,09	1,80	0,09
1,04	0,02	0,25	0,12	1,95	1,08	1,68	0,10
1,11	0,03	0,29	0,14	2,06	1,08	1,57	0,11
1,20	0,03	0,34	0,15	2,15	1,07	1,49	0,13
1,29	0,04	0,39	0,16	2,24	1,07	1,42	0,16
1,38	0,05	0,46	0,17	2,31	1,07	1,35	0,19
1,49	0,06	0,54	0,18	2,37	1,07	1,30	0,24
1,60	0,07	0,63	0,19	2,42	1,07	1,25	0,31
1,72	0,09	0,73	0,20	2,48	1,06	1,22	0,38
1,84	0,11	0,85	0,21	2,56	1,06	1,19	0,47
1,98	0,13	0,99	0,23	2,67	1,06	1,16	0,58
2,13	0,15	1,15	0,26	2,82	1,06	1,14	0,70
2,29	0,17	1,34	0,29	2,99	1,05	1,12	0,83
2,46	0,20	1,56	0,32	3,20	1,05	1,10	0,97
2,64	0,23	1,82	0,36	3,44	1,05	1,09	1,13
2,84	0,26	2,12	0,41	3,71	1,04	1,07	1,31
3,05	0,30	2,47	0,47	4,00	1,04	1,06	1,51
3,28	0,34	2,87	0,53	4,34	1,04	1,06	1,74
3,52	0,38	3,35	0,59	4,70	1,03	1,05	2,00
3,79	0,43	3,90	0,65	5,10	1,03	1,04	2,29
4,07	0,48	4,54	0,72	5,55	1,03	1,03	2,62
4,37	0,53	5,29	0,79	6,05	1,03	1,03	2,98
4,70	0,59	6,16	0,86	6,63	1,02	1,03	3,38
5,05	0,65	7,18	0,92	7,31	1,02	1,02	3,76
5,43	0,71	8,36	0,96	8,17	1,02	1,02	4,09
5,83	0,76	9,74	0,99	9,47	1,02	1,02	4,12
6,26	0,82	11,35	1,00	14,76	1,01	1,01	2,31
6,73	0,87						
7,23	0,91						
7,77	0,95						
8,35	0,97						
8,98	0,98						
9,65	0,99						
10,37	1,00						
11,14	1,00						
11,97	1,00						
12,86	1,00						
13,82	1,00						
14,86	1,00						
15,96	1,00						

## ANNEXE VIII Comparaison des distributions granulométriques des aérosols étudiés avec une loi log normale

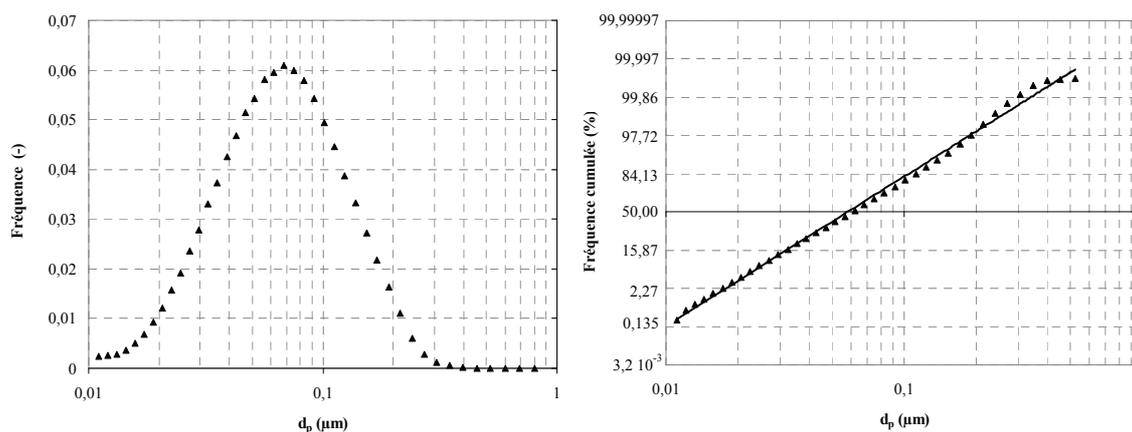
Les distributions granulométriques des aérosols sont très souvent assimilables à une loi de distribution log normale dont l'expression mathématique est la suivante :

$$f(d_p) = \frac{1}{\ln \sigma_{g,n} \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\ln d_p - \ln \bar{d}_{g,n})^2}{2(\ln \sigma_{g,n})^2} \right] \quad \text{AVIII-1}$$

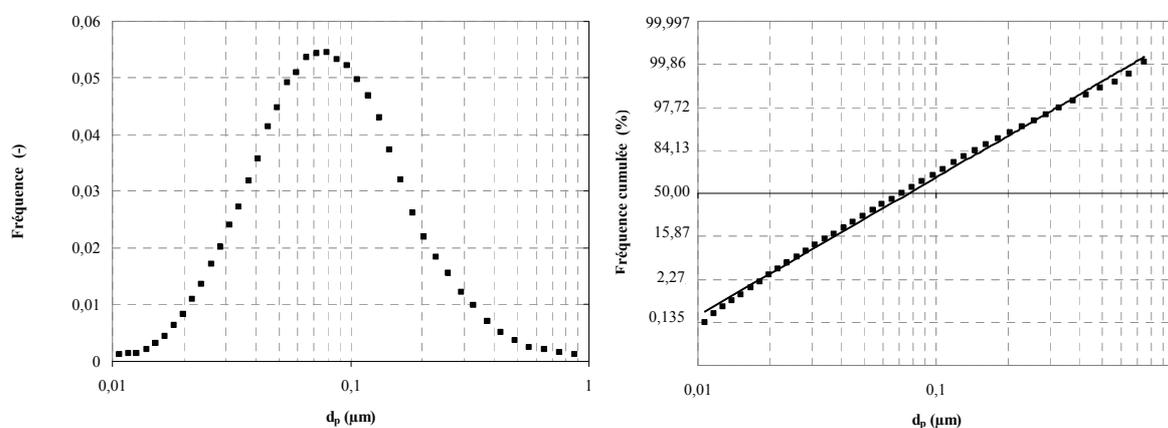
La droite de Henry est un test graphique qui permet de déterminer la manière dont la granulométrie de l'aérosol considéré est distribuée, par rapport à une loi de distribution log normale. Pour cela, la fraction de particules  $d_p \leq d_{p_i}$  est représentée en fonction de  $d_p$  sur un graphique en coordonnées gausso-logarithmiques ; si les points sont alignés sur une droite, alors la distribution granulométrique de l'aérosol suit une loi de distribution log normale ; des relations existent alors entre les différents diamètres statistiques de la distribution et l'écart-type géométrique (Renoux et Boulaud, 1998).

Les figures suivantes présentent un exemple des courbes des distributions granulométriques numériques en diamètres équivalent en volume et les droites de Henry correspondantes pour les aérosols d'uranine et de chlorure de sodium étudiés, ainsi que la courbe de distribution granulométrique massique en diamètre équivalent en volume de l'aérosol d'alumine étudié.

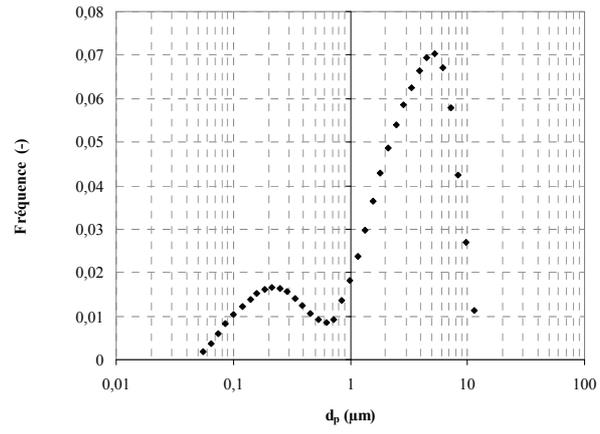
Les résultats indiquent que les aérosols de chlorure de sodium et d'uranine suivent tous les deux une loi de distribution log normale. Concernant l'aérosol d'alumine, les résultats indiquent que la distribution granulométrique est bimodale et ne peut donc pas être assimilée à une loi de distribution log normale ; c'est pourquoi la droite de Henry associée n'a pas été présentée.



*Distribution numérique en équivalent volume de l'aérosol d'uranine et droite de Henry associée*



*Distribution numérique en équivalent volume de l'aérosol du chlorure de sodium et droite de Henry associée*



*Distribution massique en équivalent volume de l'aérosol d'alumine*

## ANNEXE IX Statistiques et incertitudes

### Estimation des incertitudes liées à la mesure du Coefficient d'Épuration d'un filtre THE (Mocho, 2007)

Le coefficient d'épuration CE d'un filtre est obtenu à partir du rapport entre la concentration en uranine de l'air en amont du filtre  $C_{\text{amont}}$  et la concentration en uranine de l'air en aval du filtre  $C_{\text{aval}}$  selon la relation (1-21) :

$$CE = \frac{C_{\text{amont}}}{C_{\text{aval}}}$$

Soit la relation suivante :

$$CE = \frac{C_{\text{sol,amont}} \cdot E_{\text{amont}} \cdot V_{\text{aval}}}{C_{\text{sol,aval}} \cdot E_{\text{aval}} \cdot V_{\text{amont}}} \quad (\text{AIX-1})$$

avec :

$C_{\text{sol,amont}}$  : la concentration en uranine dans l'eau de lavage du filtre de prélèvement amont ( $\text{g.ml}^{-1}$ ),

$C_{\text{sol,aval}}$  : la concentration en uranine dans l'eau de lavage du filtre de prélèvement aval ( $\text{g.ml}^{-1}$ ),

$E_{\text{amont}}$  : le volume d'eau de lavage du filtre de prélèvement amont (ml),

$E_{\text{aval}}$  : le volume d'eau de lavage du filtre de prélèvement aval (ml),

$V_{\text{amont}}$  : le volume d'air ayant traversé le filtre de prélèvement amont ( $\text{m}^3$ ),

$V_{\text{aval}}$  : le volume d'air ayant traversé le filtre de prélèvement aval ( $\text{m}^3$ ).

L'estimation de l'incertitude relative élargie  $U_r$  liée à la mesure du coefficient d'épuration dépend principalement des incertitudes suivantes :

- l'incertitude relative élargie corrigée  $U_{r_1}$  (%) liée à l'utilisation du fluorimètre pour  $C_{\text{amont}}$ ,
- l'incertitude relative élargie corrigée  $U_{r_2}$  (%) liée à l'utilisation du fluorimètre pour  $C_{\text{aval}}$ ,
- l'erreur maximale tolérée  $EMT_{v_3}$  (ml) de la pipette jaugée utilisée pour la solution amont,
- le volume de la solution de lavage  $E_{\text{amont}}$  (ml) du filtre de prélèvement amont,
- l'erreur maximale tolérée  $EMT_{v_4}$  (ml) de la pipette jaugée utilisée pour la solution aval,
- le volume de la solution de lavage  $E_{\text{aval}}$  (ml) du filtre de prélèvement aval,
- l'incertitude relative élargie corrigée  $U_{r_5}$  (%) liée à l'utilisation du dispositif de prélèvement amont,
- l'incertitude relative élargie corrigée  $U_{r_6}$  (%) liée à l'utilisation du dispositif de prélèvement aval.

En considérant que ces incertitudes sont parfaitement indépendantes, l'incertitude relative élargie  $U_r$  liée à la mesure du coefficient d'épuration, pour un coefficient d'élargissement de  $k=2$ , est déduite de l'expression suivante :

$$U_r = \pm 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{r_1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{r_2}}{2}\right)^2 + \left(\frac{EMT_{v_3}}{3 \cdot E_{\text{amont}}}\right)^2 + \left(\frac{EMT_{v_4}}{3 \cdot E_{\text{aval}}}\right)^2 + \left(\frac{U_{r_5}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{r_6}}{2}\right)^2} \quad (\text{AIX-2})$$

Calcul des incertitudes :

- une valeur majorante de  $U_{r_1}$  et de  $U_{r_2}$  pour ces travaux est de 15 % (valeur déduite d'essais réalisés à partir de solutions étalons),

- l'erreur maximale tolérée des pipettes jaugées utilisées pour les solutions amont et aval est de 0,1 ml,
- une valeur majorante de  $U_{r_5}$  et de  $U_{r_6}$  pour ces travaux est de 10 % (valeur déterminée durant ces travaux).

L'incertitude relative élargie  $U_r$  est donc de :

$$U_r = \pm 25,49 \% \quad (\text{AIX-3})$$

#### Estimation des incertitudes liées à la pesée des filtres

La masse déposée  $m_s$  sur un filtre durant son colmatage est déterminée selon la relation :

$$m_s = m_2 - m_1 \quad (\text{AIX-4})$$

avec  $m_2$  et  $m_1$  représentant respectivement la masse du filtre après son colmatage et la masse du filtre vierge.

L'estimation de l'incertitude relative élargie  $U_r$  liée à la mesure de la masse du filtre dépend principalement de l'erreur de la balance utilisée pour la pesée des filtres.

L'incertitude relative élargie  $U_r$  liée à la mesure de la masse déposée, pour un coefficient d'élargissement de  $k=2$ , est déduite de l'expression suivante :

$$U_r = \pm 2 \cdot \sqrt{\frac{u_{m_1}^2 + u_{m_2}^2}{(m_2 - m_1)^2}} \quad (\text{AIX-5})$$

Les résultats sont également représentés à l'aide du rapport entre la masse d'eau adsorbée durant l'essai sur la masse d'aérosol déposé déterminé, selon la relation :

$$\frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \quad (\text{AIX-6})$$

avec  $m_3$  représentant la masse du filtre après son colmatage et un passage à l'étuve.

L'incertitude relative élargie  $U_r$  correspondante, pour un coefficient d'élargissement de  $k=2$ , est déduite de l'expression suivante :

$$U_r = \pm 2 \cdot \sqrt{\frac{u_{m_2}^2 + u_{m_3}^2}{(m_2 - m_3)^2} + \frac{u_{m_3}^2 + u_{m_1}^2}{(m_3 - m_1)^2}} \quad (\text{AIX-7})$$

avec  $u_{m_1} = u_{m_2} = u_{m_3} = \frac{U_{m_1}}{2} = \frac{U_{m_2}}{2} = \frac{U_{m_3}}{2} = 0,05 \text{ g}$  pour ces travaux.

#### Estimation des incertitudes liées à la mesure de la compacité des gâteaux de particules

La compacité des gâteaux de particules formés à la surface des filtres plans est déterminée à partir de la mesure de l'épaisseur  $e_g$  du dépôt et en appliquant la relation (1-44) :

$$\alpha_g = \frac{m_s}{S_f \cdot \rho_p \cdot e_g}$$

L'incertitude relative élargie  $U_r$  liée à l'estimation de la compacité d'un gâteau de particules dépend principalement des incertitudes suivantes :

- l'incertitude relative élargie  $U_{m_s}$  liée à la mesure de la masse déposée qui peut être évaluée à l'aide de la relation (AIII-5),

- l'incertitude relative élargie  $U_{S_f}$  liée à l'estimation de la surface de filtration qui peut être estimée à 5 %,
- l'incertitude relative élargie  $U_{e_g}$  liée à la mesure de l'épaisseur du gâteau et qui peut être estimée à partir de la dispersion des résultats par la relation :

$$U_{e_g} = \frac{2\sigma}{\bar{e}_g} \quad (\text{AIX-8})$$

avec  $\sigma$  l'écart-type des résultats et  $\bar{e}_g$  l'épaisseur moyenne du gâteau de particules mesurée.

L'incertitude associée à la valeur utilisée pour la masse volumique des aérosols a été négligée.

Ainsi, l'incertitude relative élargie liée à l'estimation de la compacité d'un gâteau de particules, pour un coefficient d'élargissement de  $k=2$ , peut être déduite de la relation suivante :

$$U_r = \pm 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{m_s}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{S_f}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{e_g}}{2}\right)^2} \quad (\text{AIX-9})$$

#### Estimation des incertitudes liées à l'estimation de la résistance spécifique du gâteau de particules

La résistance spécifique d'un gâteau formé de particules polydispersées à la surface d'un filtre plan est déterminée en appliquant la relation (1-43) :

$$K_{2_{\text{poly}}} = \frac{36h_k \cdot \alpha_g}{(1-\alpha_g)^3} \cdot \frac{\mu \cdot \chi}{\bar{d}_{\text{ev,m}}^2 \cdot \rho_p \cdot \text{Cu} \cdot \exp(-3 \ln^2 \sigma_g)}$$

Dans le cas où la compacité du gâteau est estimée à partir des mesures expérimentales, l'incertitude relative élargie  $U_r$  liée à l'estimation de la résistance spécifique du gâteau de particules dépend principalement de l'incertitude liée à la compacité (en raison de son importante valeur) : ainsi, les incertitudes liées aux autres paramètres de la relation (1-43) sont négligeables et cette dernière peut s'écrire :

$$K_{2_{\text{poly}}} = k \cdot \frac{\alpha_g}{(1-\alpha_g)^3} \quad (\text{AIX-10})$$

L'incertitude relative élargie liée à l'estimation de la résistance spécifique d'un gâteau de particules, pour un coefficient d'élargissement de  $k=2$ , peut donc être déduite de la relation suivante :

$$U_r = \pm 2k \cdot \frac{(1-\alpha_g)^3 + 3\alpha_g^2(1-\alpha_g)^2}{(1-\alpha_g)^6} \cdot \frac{u_{\alpha_g}}{K_{2_{\text{poly}}}} \quad (\text{AIX-11})$$

avec  $u_{\alpha_g} = u_{r\alpha_g} \cdot \alpha_g = \frac{U_{r\alpha_g}}{2} \cdot \alpha_g$  estimée à l'aide de la relation (AIX-9).

#### Intervalle de confiance

Des intervalles de confiance ont été utilisés pour exprimer la dispersion des résultats expérimentaux au niveau :

- de la distribution granulométrique des aérosols,
- de l'évolution de la perte de charge des filtres
- des masses de particules ou de vapeur d'eau déposées sur les filtres.

L'objectif d'un intervalle de confiance est d'estimer la moyenne inconnue  $m$  de  $X$  à partir de la moyenne  $\bar{x}$  calculée sur l'échantillon contenant  $n$  essais de reproductibilité effectués dans les mêmes conditions opératoires (pour le cas des colmatages, en termes de débit, température et humidité).

Durant les travaux, le nombre d'essais est généralement faible (il est le plus souvent égal à 3). Ainsi, pour un risque d'erreur  $\alpha$  donné, l'intervalle de confiance  $IC_\alpha$  est calculé en cherchant un intervalle  $[a,b]$  tel que la probabilité que  $m$  soit contenu dans cet intervalle est égale à la valeur  $(1-\alpha)$ , selon la relation :

$$IC_\alpha = \left[ \bar{x} - t \cdot \frac{\sigma_e}{\sqrt{n-1}}; \bar{x} + t \cdot \frac{\sigma_e}{\sqrt{n-1}} \right] \quad (\text{AIX-12})$$

avec  $t = q_{T_{n-1}}(1 - \frac{\alpha}{2})$  le quantile pour la loi de Student et  $\sigma_e$  l'écart-type calculé à partir des valeurs de  $X$  dans l'échantillon. L'utilisation de la loi de Student impose de faire l'hypothèse que l'échantillon est extrait d'une population normale.

Deux risques d'erreur différents ont été utilisés durant les travaux selon la grandeur étudiée : 5 et 20 %. Quelques valeurs du quantile  $t$  pour la loi de Student figurent dans le tableau suivant pour différentes valeurs de  $n$ .

*Quantiles pour la loi de Student*

$n-1 \rightarrow$	1	2	3	4	5	10	25	50
$\alpha \downarrow$								
0,05	12,710	4,303	3,182	2,776	2,571	2,228	2,060	2,009
0,2	3,078	1,886	1,638	1,533	1,476	1,372	1,316	1,299

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE  
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL  
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

**Monsieur Yves GONTHIER, Professeur, Université de Savoie, Polytech'Savoie, Le Bourget du Lac**

**Madame Laurence LE COQ, Professeur, Ecole des Mines de Nantes, Nantes**

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

**Madame JOUBERT Aurélie**

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,  
une thèse intitulée :

**"Performances des filtres plissés à Très Haute Efficacité en fonction de l'humidité relative de l'air"**

en vue de l'obtention du titre de :

**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE**

**Spécialité : « Génie des Procédés et des Produits »**

Fait à Vandoeuvre, le 30 octobre 2009

Le Président de l'IN.P.L.,

F. LAURENT



NANCY BRABOIS  
2, AVENUE DE LA  
FORET-DE-HAYE  
BOITE POSTALE 3  
F - 54501  
VANDŒUVRE CEDEX

## Résumé

Les filtres plissés à Très Haute Efficacité (THE) sont utilisés pour le maintien du confinement des substances radioactives dans les installations nucléaires ; ils constituent ainsi un des éléments sensibles de la sûreté nucléaire. Certains scénarios accidentels, comme l'apparition d'une brèche sur une tuyauterie avec relâchement de vapeur, peuvent conduire à une forte augmentation de l'humidité relative de l'effluent gazeux filtré. Ces travaux permettent de pallier le manque de données analytiques dans la littérature concernant le comportement des filtres plissés THE, en termes de variations de leur perte de charge et de leur efficacité, en cas d'exposition à un débit d'air humide non saturé.

Des expériences de colmatage de filtres ont été réalisées sur un banc d'essais à l'aide de deux aérosols : un aérosol non-hygroscopique micronique d'alumine et un aérosol hygroscopique submicronique de chlorure de sodium. Les résultats ont mis en évidence que l'influence de l'humidité durant le colmatage d'un filtre THE dépend de plusieurs paramètres : la géométrie du filtre (plane ou plissée), la granulométrie et la nature hygroscopique de l'aérosol de colmatage et enfin, le temps d'interaction entre l'aérosol et l'air humide. Des mesures d'efficacité des filtres plissés vierges et à différents degrés de colmatage, réalisées avec l'aérosol normalisé d'uranine, se sont également révélées sensibles à la présence plus ou moins importante d'humidité relative dans l'air. Enfin, l'ensemble des résultats a permis d'élaborer une approche empirique d'estimation de l'évolution de la perte de charge d'un filtre THE ; le modèle qui en résulte est applicable durant la formation sous humidité d'un gâteau de particules sans réduction de la surface de filtration.

*Mots-clés : filtration, filtre plissé THE, humidité relative, hygroscopicité, perte de charge, efficacité.*

## Abstract

Pleated High Efficiency Particulate Air (HEPA) filters are used for maintaining the containment of radioactive substances in nuclear plants; thus, they are sensitive elements of nuclear safety. Some accidental situations, such as the emergence of a hole on a pipe with release of steam, can lead to a high increase of the air humidity. This work can overcome the lack of analytical data in the literature regarding the behaviour of pleated HEPA filters, in terms of changes in pressure drop and efficiency, in presence of humidity (unsaturated air).

Experimental clogging tests have been performed on a test bench with two aerosols: non-hygroscopic micronic alumina particles and hygroscopic submicronic sodium chloride particles. The results showed that the influence of humidity during the clogging of a HEPA filter depends on several parameters: the geometry of the filter (plane or pleated), the size distribution and hygroscopicity of the aerosol clogging and finally the interaction time between the aerosol and humid air. Measurements of efficiency of clean and clogged filters (at different degrees of clogging), performed with the normalized soda fluorescein aerosol, are also sensitive to the presence of more or less relative humidity in the air. Finally, all results helped to develop an empirical model for estimating the evolution of the pressure drop of HEPA filters; this model is applicable during the formation of the particulate cake in presence of humidity without reducing of the surface area filtration.

*Keywords: filtration, pleated HEPA filter, relative humidity, hygroscopicity, pressure drop, efficiency.*